

平成 28 年度

修士論文

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

指導教員            三島直生    准教授

畑中重光    教授

花里利一    教授

三重大学大学院工学研究科

建築学専攻

E RIDENGAOQIER

—目次—

第1章 序論 .....	1
1.1 はじめに .....	1
1.2 ポーラスコンクリートとは .....	2
1.3 ポーラスコンクリートの研究の現状 .....	3
1.4 本研究の目的 .....	4
1.5 本論文の構成 .....	5
第1章の参考文献 .....	6
第2章 既往の研究 .....	7
2.1 はじめに .....	7
2.2 空隙特性 .....	8
2.3 力学特性 .....	9
2.4 超音波伝播特性 .....	12
2.5 ポーラスコンクリート舗装の品質管理手法 .....	15
2.6 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試験体の圧縮強度と曲げ強度に関する実験 .....	22
3.1 はじめに .....	22
3.2 実験方法 .....	23
3.2.1 実験の要因と水準 .....	23
3.2.2 使用材料および調合 .....	23
3.2.3 試験体の作製方法 .....	25
3.2.4 試験方法 .....	26
3.3 実験結果とその考察 .....	27
3.3.1 空隙率試験結果 .....	27
3.3.2 圧縮強度試験結果 .....	28
3.3.3 曲げ強度試験結果 .....	30
3.3.4 圧縮強度と曲げ強度の関係 .....	32
3.4 まとめ .....	34
第3章の参考文献 .....	35
第4章 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 .....	36
4.1 はじめに .....	36

4.2	実験方法	36
4.2.1	実験の要因と水準	36
4.2.2	使用材料および調合	38
4.2.3	試験体の作製方法	38
4.2.4	試験方法	38
4.3	実験結果とその考察	42
4.3.1	供試体のセメントペーストの垂れの状況	42
4.3.2	空隙率試験結果	42
4.3.3	圧縮強度試験結果	44
4.3.4	曲げ強度試験結果	46
4.3.5	空隙率と圧縮／曲げ強度の関係	47
4.4	まとめ	48
	第4章の参考文献	49
<b>第5章</b>	<b>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</b>	<b>50</b>
5.1	はじめに	50
5.2	実験Ⅰ 超音波伝播速度法によるポーラスコンクリートの空隙率推定 に関する実験	51
5.2.1	実験方法	51
(1)	実験の要因と水準	51
(2)	使用材料および調合	51
5.2.3	試験体の作製方法	51
(3)	試験体の作製方法	51
(4)	試験方法	52
5.2.2	実験結果とその考察	55
(1)	対面法	55
(2)	表面法	57
(3)	表面法と対面法の比較	58
5.2.3	実験Ⅰのまとめ	59
5.3	実験Ⅱ 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	60
5.3.1	実験方法	60
(1)	実験の要因と水準	60
(2)	使用材料および調合，試験体の作製方法，および試験方法	60
5.3.2	実験結果とその考察	61
(1)	シリコーンシート	61
(2)	岩石	62

(3) ポーラスコンクリート .....	63
5.3.3 実験Ⅱのまとめ .....	65
第5章の参考文献 .....	66
<b>第6章 ポーラスコンクリートにおける超音波伝播速度のモデル解析</b> .....	67
6.1 はじめに .....	67
6.2 解析の概要 .....	67
6.2.1 解析モデルの選定根拠 .....	67
6.2.2 解析方法 .....	68
(1) 空隙率の算定方法 .....	69
(2) 超音波の伝播経路を仮定した検討 .....	69
(3) 各材料の面積比による直列モデルによる検討 .....	71
6.3 解析結果とその考察 .....	72
6.3.1 超音波の伝播経路を仮定した検討 .....	72
6.3.2 各材料の面積化による直列モデルによる検討 .....	74
6.3.3 既往の研究との比較 .....	75
6.4 まとめ .....	76
第6章の参考文献 .....	77
<b>第7章 ポーラスコンクリートの品質管理手法</b> .....	78
7.1 はじめに .....	78
7.2 ポーラスコンクリート舗装の施工手順 .....	78
7.3 強度管理方法試案と新方法の提案 .....	79
7.4 まとめ .....	80
第7章の参考文献 .....	81
<b>第8章 総括および今後の課題</b> .....	82
8.1 総括 .....	83
8.2 今後の課題 .....	84
<b>謝辞</b> .....	85

## 第1章 序論

### 1.1 はじめに

私たちの生活を支えている経済活動は、健全な環境があつ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<sup>1-1)</sup>。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う、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挙げられる。


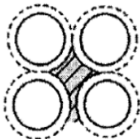
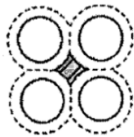

このように、経済活動は環境問題に関しては人類に悪い影響を及ぼしているが、我々の生活を支えている経済活動は止めるわけにはいかない。経済活動と環境は人類の生活には両方不可欠である。このため、環境負荷を軽減できる方法で、我々の生活を支える経済活動を行うことが、国際社会の今後の発展していく中での注意すべきことになっている。建築土木の分野でも、環境問題を考慮したグリーン建築の提案、建築構造および設備改良によるエネルギー負荷の軽減方法の提案、環境負荷低減型材料の開発・研究などが進められてきた。環境負荷低減型材料としてコンクリート分野では、透水性、透気性および吸音性に優れ、水質浄化、生物のすみかといった機能も有しているポーラスコンクリートがある。ポーラスコンクリートは、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。これまでもポーラスコンクリートの各特性、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。

## 1.1 ポーラスコンクリートとは

ポーラスコンクリートは粗骨材と、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<sup>1-2)</sup>。表 1.1 には、ポーラスコンクリートの空隙の分類と名称<sup>1-3)</sup>を示す。なお、ポーラスコンクリートの空隙の分類には、文献<sup>1-2)</sup>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。

ポーラスコンクリート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<sup>1-3)</sup>

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		<div><div>← 透水性 →</div><div>← 揚水・保水性 →</div><div>← 強度・力学特性 →</div></div>		
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	
		全空隙		
	質量法	全空隙		

### 1.3 ポーラスコンクリートの研究の現状

ポーラスコンクリートは、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<sup>1-4)</sup>。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 1.1 に、2003 年から 2013 年の間のポーラスコンクリート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いのがわかる。

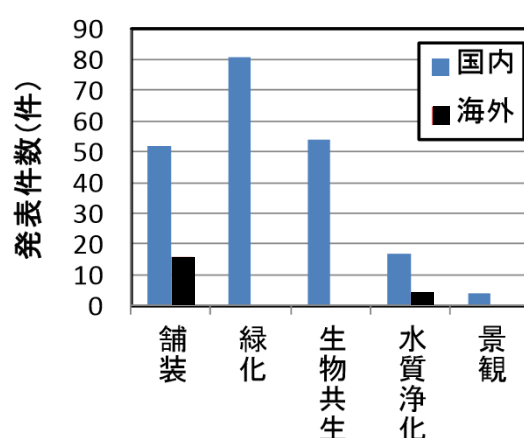


図 1.1 ポーラスコンクリートの用途別論文件数<sup>1-2)</sup>

ポーラスコンクリートの国内で行われた研究委員会およびシンポジウムとしては、「エココンクリート研究委員会報告書」、「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」および「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」などがあり、最新のものでは、「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」(2015.6,JCI)がある。

#### 1.4 本研究の目的

ポーラスコンクリートは、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、ポーラスコンクリート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、ポーラスコンクリート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、ポーラスコンクリートでは、同じフレッシュポーラスコンクリートを用いたとしても、実構造物と型枠供試体では、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、現時点でのポーラスコンクリートの品質評価手法としては、現場で施工されたポーラスコンクリート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、現場に施工されたポーラスコンクリートを対象として、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の提案を試みる。



## 1.5 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、ポーラスコンクリート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、ポーラスコンクリートの品質管理手法および超音波伝播速度と空隙率の関係に関する既往の研究を取りまとめる。

第3章ポーラスコンクリート試験体の圧縮強度と曲げ強度関係に関する実験では、空隙率、水セメント比および粗骨材の粒径を変化させたポーラスコンクリート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。

第4章現場に施工されたポーラスコンクリートの品質評価に関する実験では、歩道および建物外構を想定したポーラスコンクリート舗装から切り出した供試体（コア供試体）と型枠に打設した供試体（型枠供試体）による強度および空隙率の比較を行い、現場施工されたポーラスコンクリートの現実的な品質管理手法に関して検討を行う。

第5章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では、第3章の曲げ試験体を用いて、ポーラスコンクリート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および曲げ強度の推定の可能性を検討するための実験を行う。

第6章ポーラスコンクリートにおける超音波伝播速度のモデル化解析では、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いて、理想化したモデルを用いて二次元の理論解析を行う。既往の研究と第5章の実測データを比較し、その関係について検討する。

第7章では、本研究で得られた実験結果に基づいて、現場に施工されたポーラスコンクリートの、より簡便かつ実用的な品質管理手法の提案を行う。

第8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) 平成 27 年版 環境・循環型社会・生物多様性白書
- 1-2) 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
- 1-3) 性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, pp.1-157, 2015.7
- 1-4) 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

## 第2章 既往の研究

### 2.1 はじめに

ポーラスコンクリートの研究は、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」<sup>2-1)</sup>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。

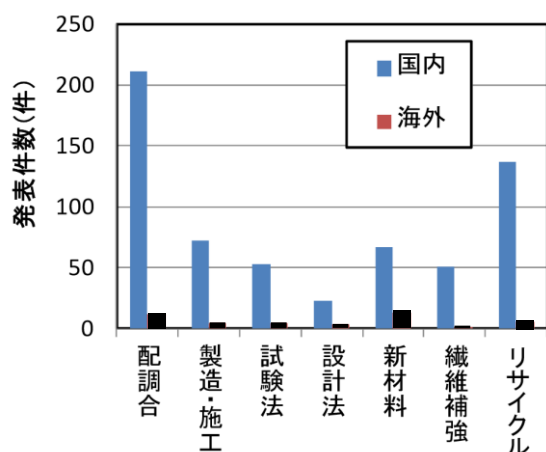


図 2.1 ポーラスコンクリートの製造方法・使用材料ごとの論文件数<sup>2-1)</sup>

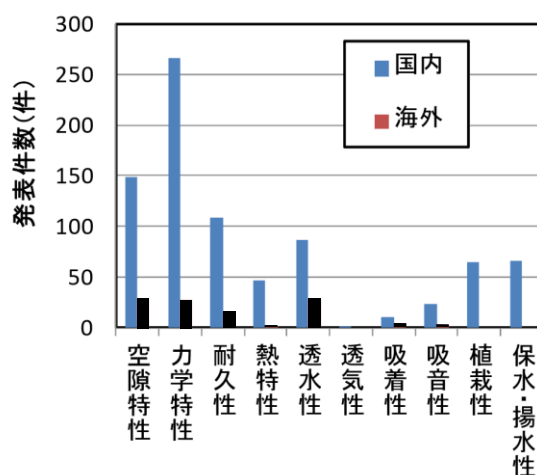


図 2.2 ポーラスコンクリートの特性ごとの論文件数<sup>2-1)</sup>

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空隙特性、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 空隙特性

図 2.2, 図 2.3 に, ポーラスコンクリート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<sup>2-2)</sup>, 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<sup>2-3)</sup>によると, 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している。

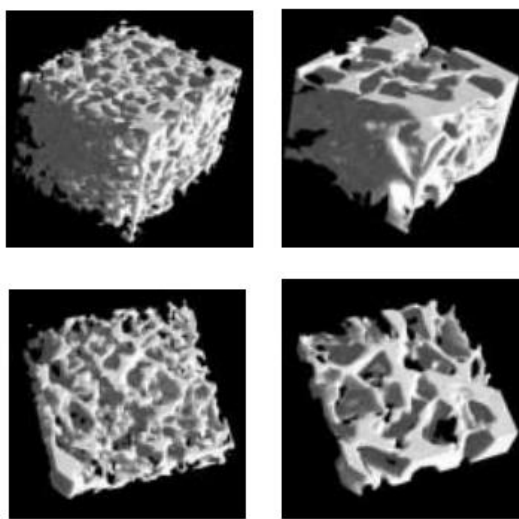


図 2.2 空隙性状<sup>2-3)</sup>

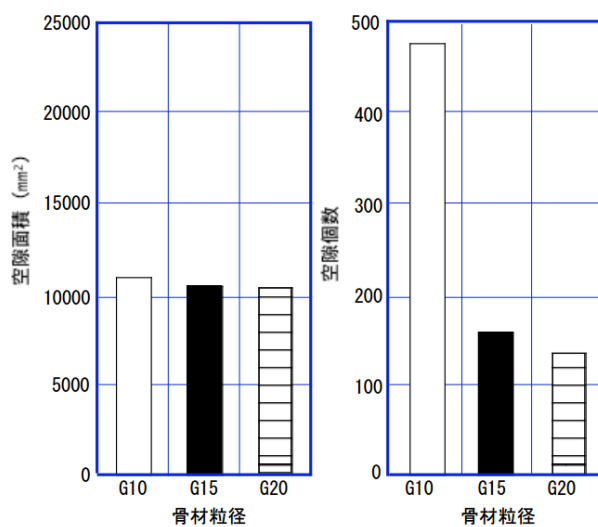


図 2.3 空隙面積<sup>2-4)</sup>

図 2.4 空隙個数<sup>2-4)</sup>

## 2.3 力学特性

### (1) 圧縮強度

式 2.1 と式 2.2 には，文献<sup>2-4)</sup>と文献<sup>2-5)</sup>に提案されたポーラスコンクリートの圧縮強度の推定式を示す。

$$Y = A \exp(Bx) \quad (2.1)$$

$$B = 0.0024 C + 0.0602$$

ここに， $Y$ ：圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ )， $A$ ：結合材強度( $\text{N/mm}^2$ )， $x$ ：全空隙率(%)， $C$ ：粗骨材の粒径範囲の最大粒径と最小粒径の平均値(mm)

$$F_c = 12.6 k (0.48 (C/W) - 0.87) e^{0.61 D_d - 0.06 V_a} \quad (2.2)$$

ここに， $F_c$ ：圧縮強度( $\text{N/mm}^2$ )， $k$ ：セメント種類による影響係数  
(普通，早強ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種については， $k=1$ )  
 $C/W$ ：セメント水比， $D_d$ ：骨材の絶乾密度( $\text{g/cm}^3$ )， $V_a$ ：空隙率(%)

いずれの推定式においても，圧縮強度に大きな影響を及ぼすのは，空隙率，セメントペーストおよびモルタル（以下，結合材と称する）の強度，骨材の性質である。これは，文献<sup>2-6)</sup>に示された圧縮強度に影響を及ぼす主な因子とも同じである。また，文献<sup>2-1)</sup>に示された式(2.2)による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 2.2 に示す。

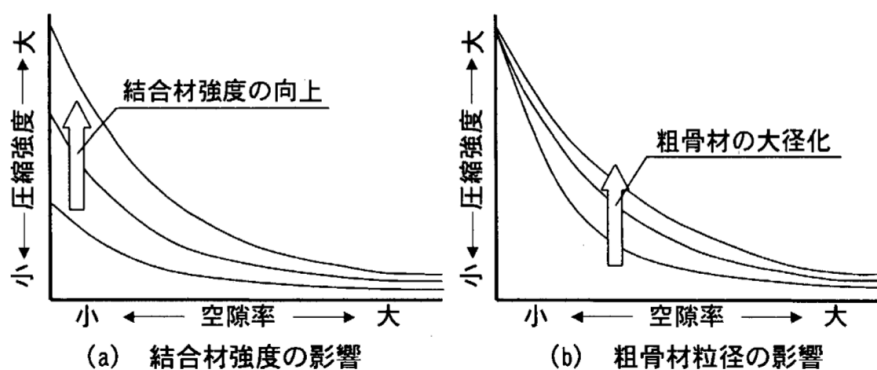


図 2.4 圧縮強度と空隙率関係に及ぼす影響<sup>2-1)</sup>

また、文献<sup>2-7)</sup>には、球体と仮定した骨材を立方格子、斜方格子、体心立方格子の各配置とした理想球体モデルを用いて、空隙率と圧縮強度の関係を理論的に検討している。図 2.5 に、斜方格子モデルにおける圧縮強度と空隙率の関係を示す。図によると、加圧方向 1 の計算値はポーラスコンクリートの実測値とより近い値となっている。

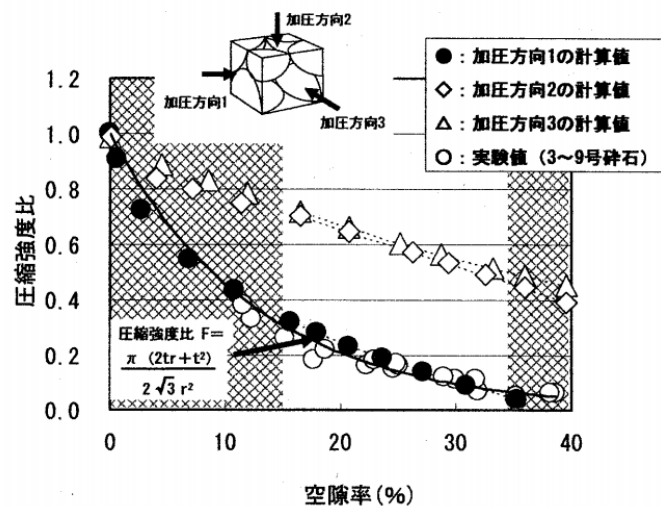


図 2.5 斜方格子配列の圧縮強度比と空隙率関係<sup>2-7)</sup>

## (2) 曲げ強度

図 2.6 に、文献<sup>2-8)</sup> (左) と文献<sup>2-9)</sup> (右) の骨材粒径が異なる試験体によるポーラスコンクリート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している。このことから、曲げ強度に影響を及ぼす因子は圧縮強度と異なることが確認された。また、曲げ強度に影響を与える因子について、理想球体骨材を用いて検討した文献<sup>2-10)</sup>による曲げ強度とセメント水比および球径（骨材粒径）の関係は、図 2.7 のようである。

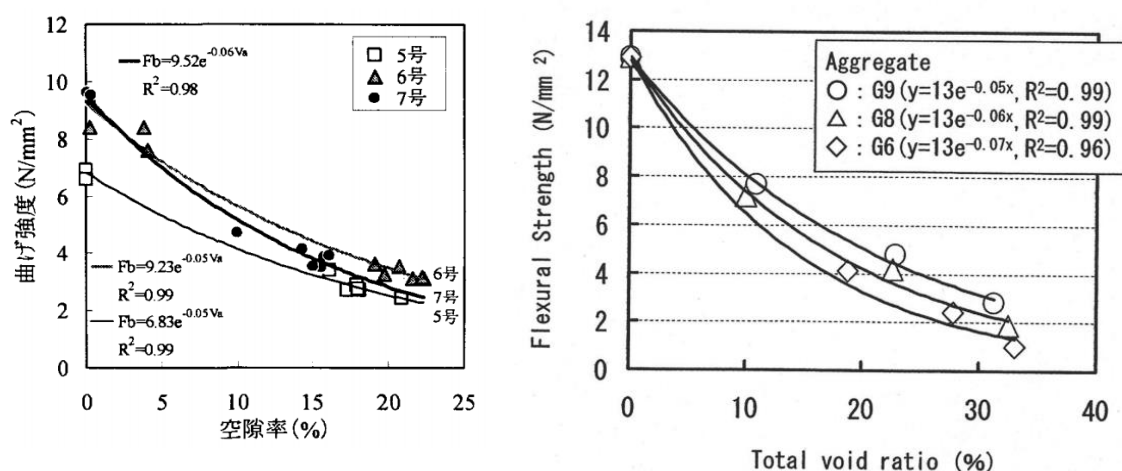


図 2.6 ポーラスコンクリートの曲げ強度と空隙率の関係<sup>2-8), 2-9)</sup>

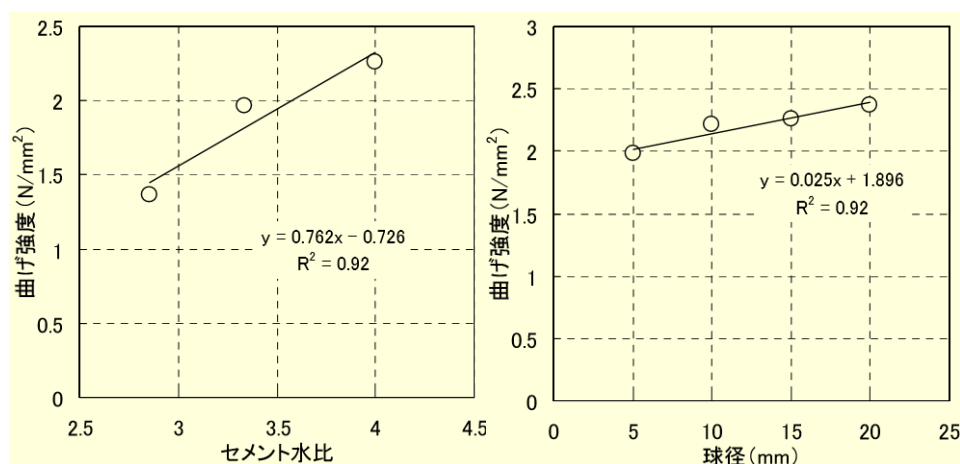


図 2.7 ポーラスコンクリートの曲げ強度に影響を与える  
セメント水比と球径（骨材粒径）の影響<sup>2-10)</sup>

## 2.4 超音波伝播特性

ポーラスコンクリートの超音波伝播速度については、検討例が少ないのが現状である。文献<sup>2-11)</sup>によると、ポーラスコンクリート試験体の打ち込み面から底面の方向で、上中下段の順で超音波伝播速度は減少する。曲げ強度は超音波伝播速度は大きくなるほど大きくなる傾向がある。図 2.8 に、ポーラスコンクリートの試験体の上中下段における超音波伝播速度を示し、図 2.9 にポーラスコンクリートの超音波伝播速度と曲げ強度の関係を示す。

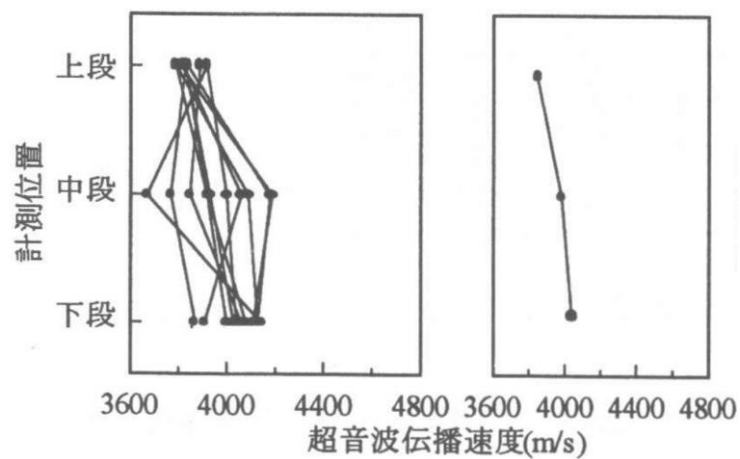


図 2.8 ポーラスコンクリート試験体の上中下段における超音波伝播速度<sup>2-11)</sup>

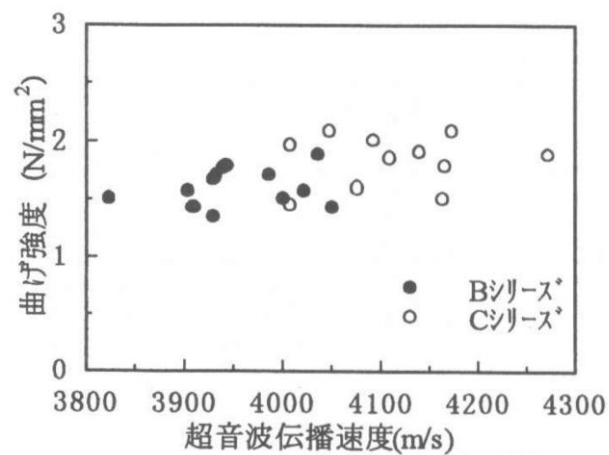


図 2.9 ポーラスコンクリートの超音波伝播速度と曲げ強度の関係<sup>2-11)</sup>



図 2.10 に、文献<sup>2-12)</sup>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。

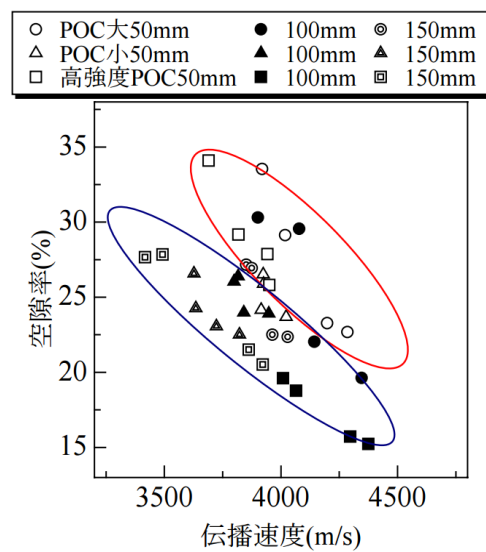


図 2.10 ポーラスコンクリートの超音波伝播速度と空隙率の関係<sup>2-12)</sup>

図 2.11 に、文献<sup>2-13)</sup>による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。文献<sup>2-13)</sup>の試験体は、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。図によると、碎石の方が超音波伝播速度が大きくなっているが、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比較的良好に近似できるとしている。

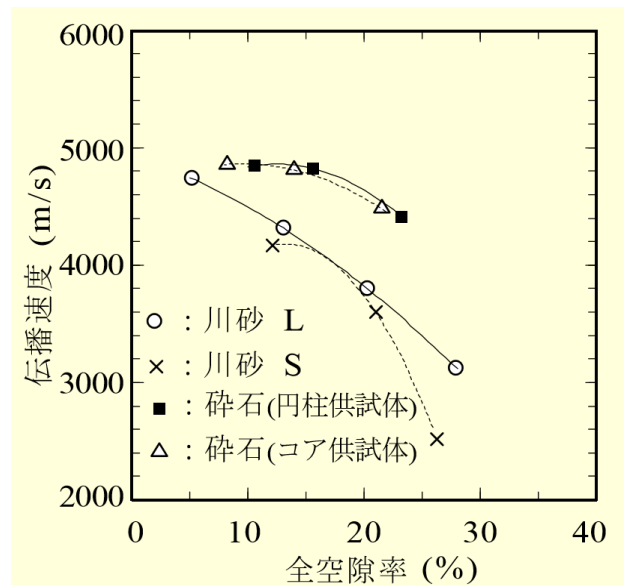


図 2.11 ポーラスコンクリートの超音波伝播速度と空隙率の関係<sup>2-13)</sup>

## 2.5 ポーラスコンクリート舗装の品質管理手法

ポーラスコンクリート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，現場施工されたスラブの品質評価に必要とされる空隙率および各種の力学特性に関する品質管理方法について，既往の研究をまとめる。現時点では，現場で構造体からコア試験体を採取してポーラスコンクリートの空隙および力学特性を評価している。

### (1) 空隙特性の評価

文献<sup>2-1)</sup>によると，現場から採取したコア試験体を用いて，図 2.12 のように高さ方向の連続空隙率の分布を水中で作用する浮力により測定する方法（浮力法）が提案されている。

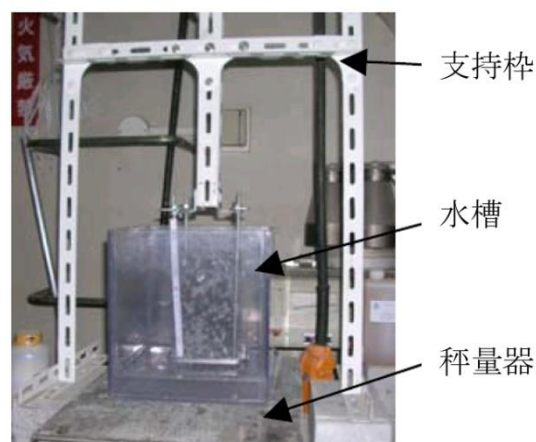


図 2.12 浮力法<sup>2-1)</sup>

コア採取によらない空隙率の評価法として，図 2.13 のような超音波伝播速度法による空隙の検討した研究や図 2.14 のようなサーモグラフィー法による空気量の影響を検討した研究など報告されている。

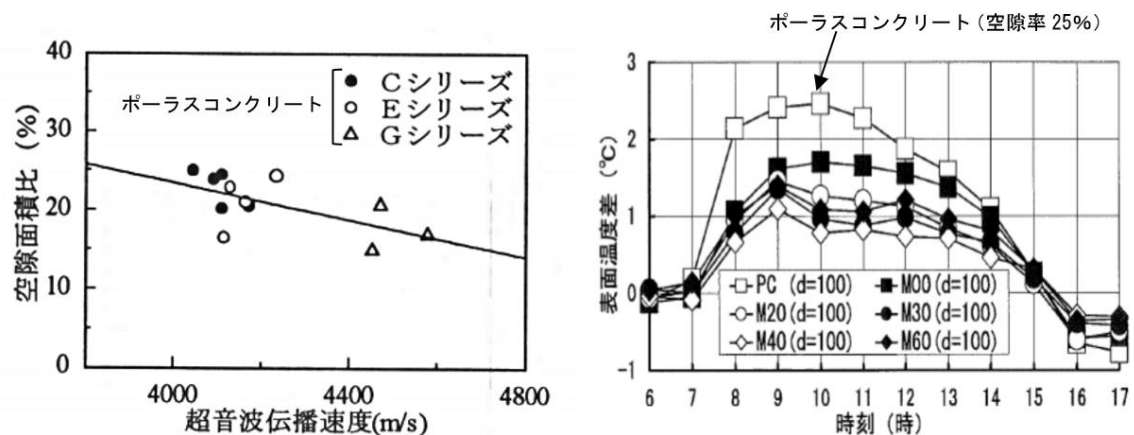


図 2.13 超音波伝播速度と空隙面積比関係<sup>2-1)</sup>

図 2.12 表面温度差の経時変化に及ぼす空気量の影響<sup>2-1)</sup>

現場施工されたポーラスコンクリートでは施工時の締固めによる振動締め固めエネルギーと空隙率は相関があるとの報告がある<sup>2-14)</sup>。その関係を、図 2.14 に示す。この結果と式 (2.3) を用いて、施工する際に振動締め固めエネルギーによる品質管理方法が提案されている<sup>2-14)</sup>。

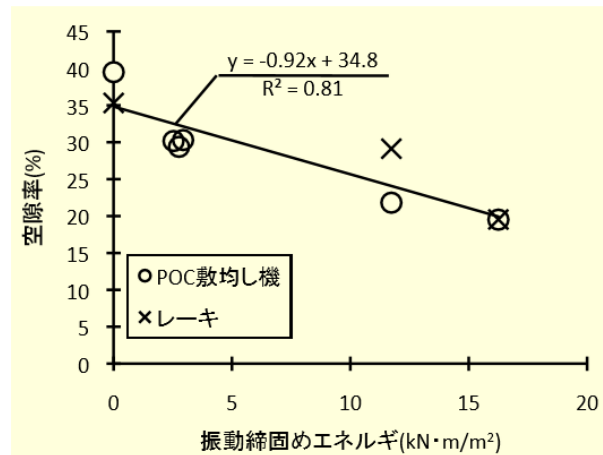


図 2.14 空隙率と振動締固めエネルギー関係<sup>2-14)</sup>

$$E = 2a(W + F/2)n \cdot t \cdot 1/S \quad (2.3)$$

$$a = \frac{F/m}{\omega^2} = \frac{F/m}{(2\pi n)^2}$$

ここに、E: 振動締固めエネルギー(N·m/m²), a: 片振幅(m),  
W: 振動機重量(N), m: 振動機重量(kg), n: 振  
動数(Hz),  $\omega$ : 角振動数(rad/sec), t: 締固め時間  
(sec), S: 転圧盤面積(m²)

## (2) 強度管理方法

現場施工された構造体ポーラスコンクリートの強度評価については、構造物の空隙率と、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の提案の可能性を検討することを目的とし、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<sup>2-1), 2-15)</sup>。実験要因を表 2.1 に、結果を図 2.15～図 2.18 に示す。共通実験は異なるの 10 機関により協力して行われている。

表 2.1 各共通実験の参加機関の実験要因<sup>2-1)</sup>

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	○

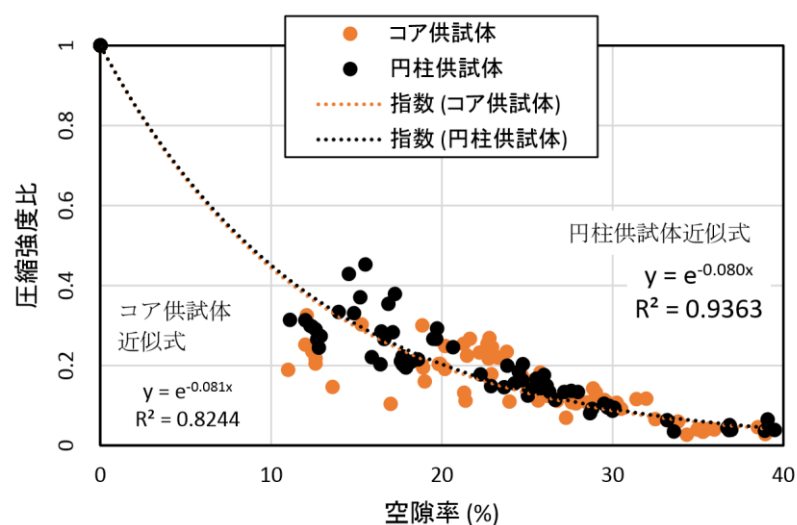


図 2.15 圧縮強度比と空隙率関係（型枠試験体とコア試験体の比較）<sup>2-1)</sup>

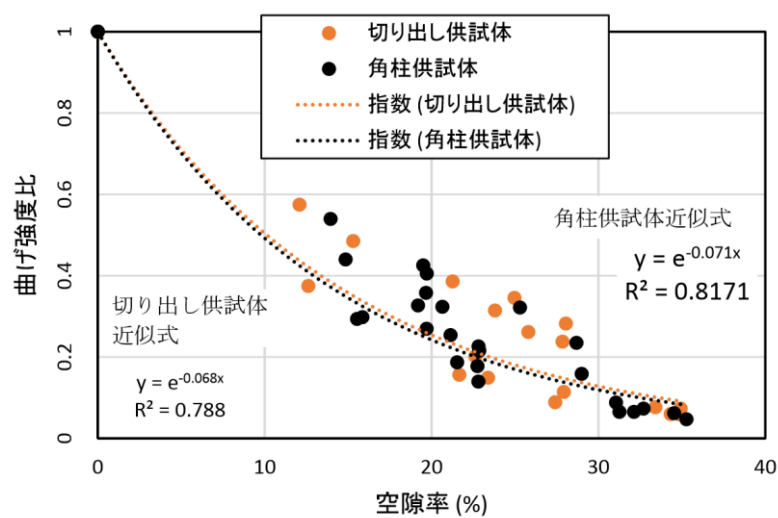


図 2.16 曲げ強度比と空隙率関係（型枠試験体とコア試験体の比較）<sup>2-1)</sup>

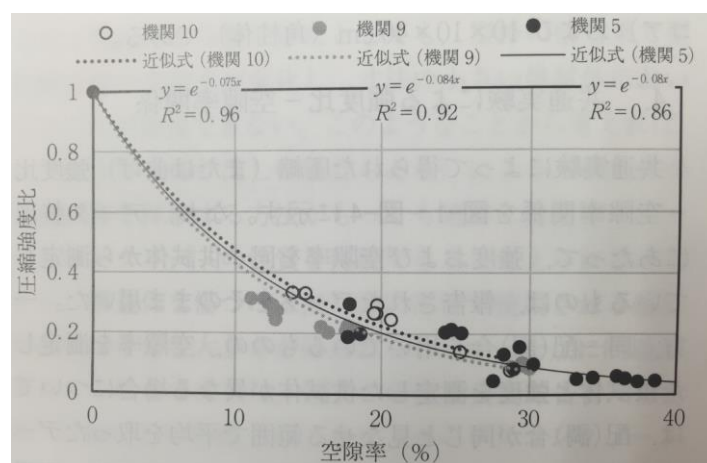


図 2.17 圧縮強度比と空隙率関係（実施機関別）<sup>2-15)</sup>

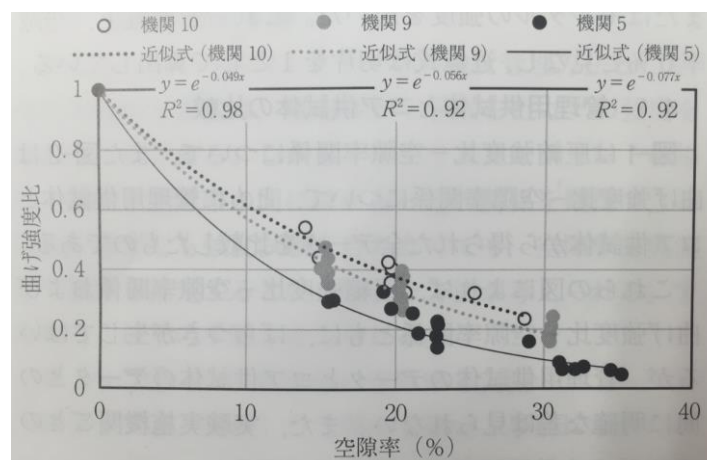


図 2.18 曲げ強度比と空隙率関係（実施機関別）<sup>2-15)</sup>

実験結果によれば、現場施工された構造体ポーラスコンクリートの強度は、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。

## 2.6 まとめ

本章では、ポーラスコンクリートの空隙率、力学特徴および超音波伝播特徴などに関する既往の研究成果を紹介して、現場に施工されたポーラスコンクリートの品質管理手法についても既往の研究を整理した。ポーラスコンクリート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) 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
- 2-3) 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)
- 2-4) 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, 70(594), pp.17-23, 2005.8
- 2-5) 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, 70(590), pp.25-30, 2005.4
- 2-6) 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, 70(585), pp.31-37, 2004.11
- 2-7) 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, 73(625), pp.363-368, 2008.3
- 2-8) 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
- 2-9) 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
- 2-10) 大谷俊浩, 村上聖, 清原千鶴, 佐藤嘉昭, 三井宜之: 理想球形骨材を用いたポーラスコンクリートの曲げ強度に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1017-1018, 2006.9
- 2-11) 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
- 2-12) 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
- 2-13) 石黒 寛, 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
- 2-14) 森鼻泰大, 現場施工ポーラスコンクリートの施工標準と品質管理手法に関する研究,



- 三重大学大学院工学研究科修士論文, pp.10-135, 2010
- 2-15) 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試験体の圧縮強度と曲げ強度に関する実験

#### 3.1 はじめに

第2章でも述べたとおり、ポーラスコンクリートは、普通コンクリートと異なり、ポーラスコンクリートは施工時の締固めの程度によりその品質が大きく変動するため、同じコンクリートを用いて作製した型枠試験体などによる品質評価の妥当性が議論となる場合がある<sup>3-1)</sup>。この対策として、現場施工されたポーラスコンクリートから採取されたコア試験体などによる品質評価が検討されている。

また、ポーラスコンクリートを道路舗装に適用する際には、曲げ強度が必要性能として要求される場合が多い。しかし、現場に施工されたポーラスコンクリートから直接曲げ試験体を採取することは非常に困難であり、現実的でない。一方で、円柱型のコア試験体を採取することは比較的容易であり、品質管理上は、このコア試験体による圧縮強度試験の結果から曲げ強度が推定できれば、作業の軽減が可能となると考えられる。

これまでに、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  $1/5 \sim 1/4$  であるとする記述<sup>3-2)</sup>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<sup>3-3)</sup>もある。最近では、ポーラスコンクリートに対して以下のような関係式<sup>3-4)</sup>も提示されている。しかし、現時点では検討例も少なく、さらなるデータの蓄積が必要である。

$$Fb = 0.563 Fc^{0.658} \quad (3.1)$$

ここに、 $Fb$  : 曲げ強度(N/mm<sup>2</sup>),  $Fc$  : 圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

そこで筆者らは、空隙率、水セメント比および粗骨材の粒径を変化させたポーラスコンクリートの圧縮および曲げ強度試験を行い、その結果から、圧縮強度による曲げ強度の推定の可能性を検討するための実験を行った。

## 3.2 実験方法

### 3.2.1 実験の要因と水準

表 3.1 に、本実験の要因と水準を示す。本実験では、ポーラスコンクリートの幅広い調合に対して、強度特性を評価するために、ポーラスコンクリート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て取り上げた。

表3.1 実験の要因と水準

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

[注] —：基本水準を示す

### 3.2.2 使用材料および調合

表 3.2 に、ポーラスコンクリートの使用材料を示す。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3.2 ポーラスコンクリートの使用材料

使用材料	種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	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	—
	ゼルロース系増粘剤	—	—

表 3.3 に、ポーラスコンクリート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 3.1 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目視で評価した結果も示す。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 3.2 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3.3 ポーラスコンクリートの調合表およびペーストフロー値

粗骨材 種類	W/C	設計VR (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			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]VR: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, \*: 大は供試体底部面積の70%以上, 中は供試体底部面積の40%~70%, 小は供試体底部面積の40%以下



(a) 目標 FL=150



(b) 目標 FL=190



(c) 目標 FL=210

(6号, W/C=0.30, 設計 VR=15%) (6号, W/C=0.30, 設計 VR=25%) (7号, W/C=0.30, 設計 VR=25%)

写真 3.1 セメントペーストのフロー試験結果の例



写真 3.2 試験体の底部の垂れの状況の例

(6号, W/C=0.30, 設計 VR=25%, ペーストの垂れ: 大)

### 3.2.3 試験体の作製方法

ポーラスコンクリートの練混ぜには、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ポーラスコンクリートは、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号砕石を用いたポーラスコンクリートでは、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、以下の計算式<sup>3-5)</sup>に基づき、型枠に対する充填質量締固め度を計算値の97%として打ち込んだ。

$$D_{poc} = m_f / m_p \times 100 \quad (3.2)$$

ここに、 $D_{poc}$ ：締固め度(%),  $m_f$ ：施工時の単位体積あたりの質量(kg),  
 $m_p$ ：配（調）合上の単位体積あたりの質量 (kg)

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。

ポーラスコンクリート試験体とは別に、ポーラスコンクリート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。

### 3.2.4 試験方法

#### (1) 空隙率試験

ポーラスコンクリート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ポーラスコンクリートの空隙率試験方法（案）<sup>3-6)</sup>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）<sup>3-6)</sup>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ポーラスコンクリート試験体（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

ポーラスコンクリートの圧縮強度試験は、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 3.3(a)に、キャッピングしたポーラスコンクリート円柱試験体を示す。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。

ポーラスコンクリートとは別に、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

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 3.3(b)に、試験体のキャッピングの例を示す。

ポーラスコンクリートとは別に、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 3.3 キャッピングした試験体

### 3.3 実験結果とその考察

#### 3.3.1 空隙率試験結果

図 3.1 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<sup>3-7)</sup>。

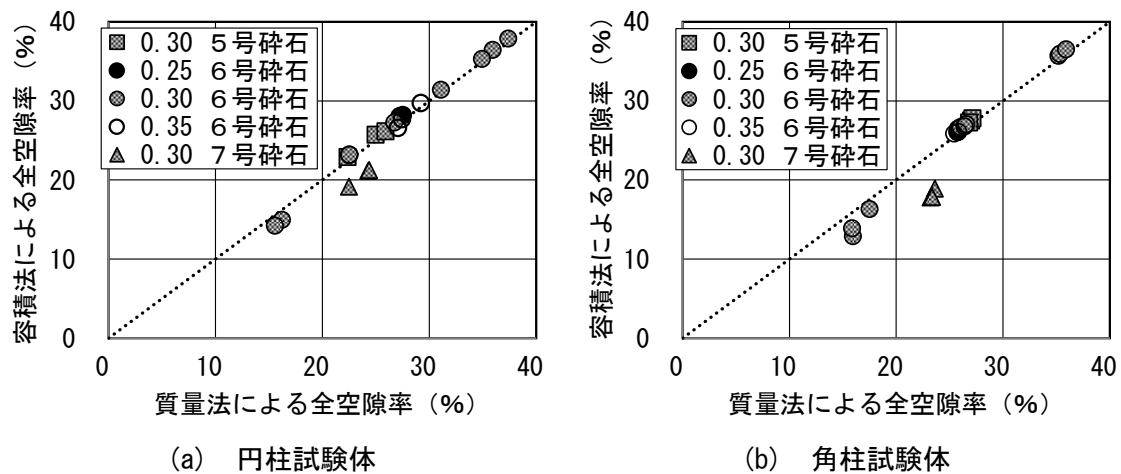


図 3.1 質量法と容積法による全空隙率の比較



図 3.2 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。

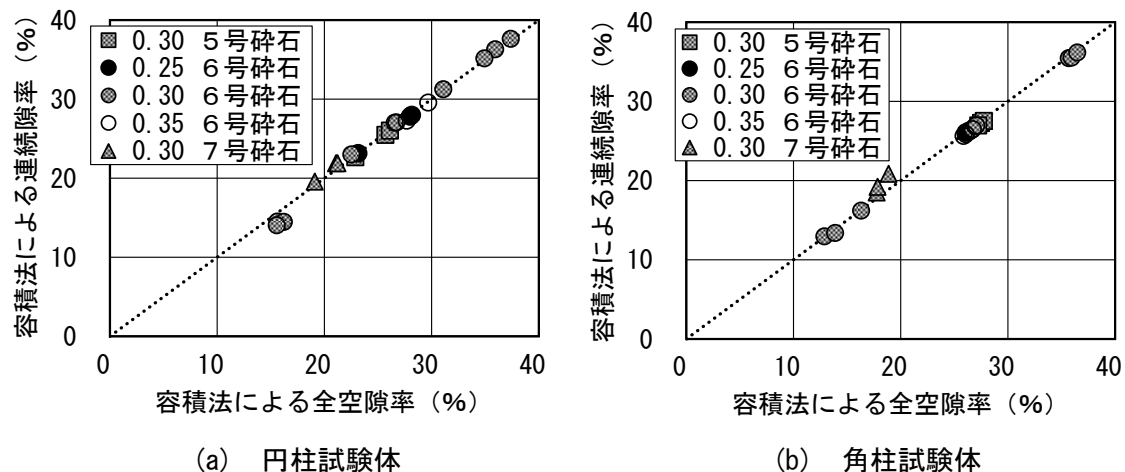


図 3.2 容積法による全空隙率と連続空隙率の比較

### 3.3.2 圧縮強度試験結果

#### (1) セメントペースト

図 3.3 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。

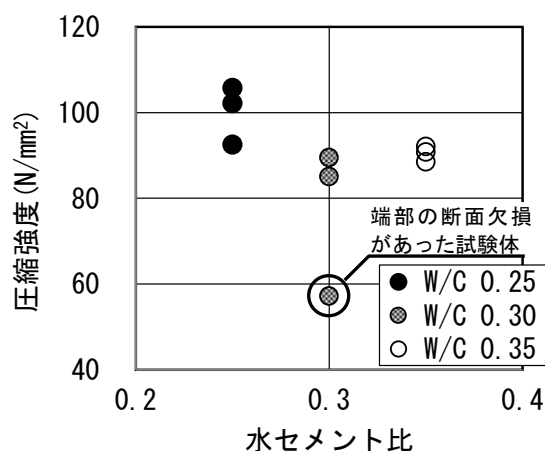


図 3.3 セメントペーストの圧縮強度と水セメント比の関係



## (2) ポーラスコンクリート

図 3.4 に、ポーラスコンクリート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<sup>3-8)</sup>で提案したポーラスコンクリート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 3.3 に示した実測結果の平均値とした。

実験結果からは、ポーラスコンクリート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、ポーラスコンクリート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。

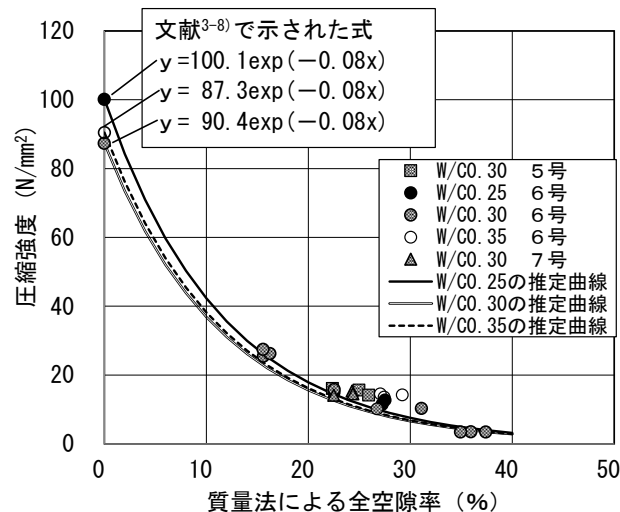


図 3.4 ポーラスコンクリートの圧縮強度と空隙率の関係

### 3.3.3 曲げ強度試験結果

#### (1) セメントペースト

図 3.5 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。

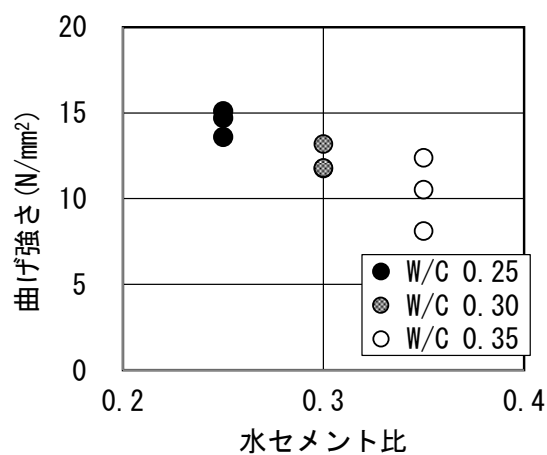


図 3.5 セメントペーストの曲げ強さと水セメント比の関係

## (2) ポーラスコンクリート

図 3.6 に、ポーラスコンクリート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ない、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。ここで、6号砕石の水セメント比 0.30 の場合による近似曲線のみ示す。

実験結果からは、ポーラスコンクリート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<sup>3-4)</sup>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。

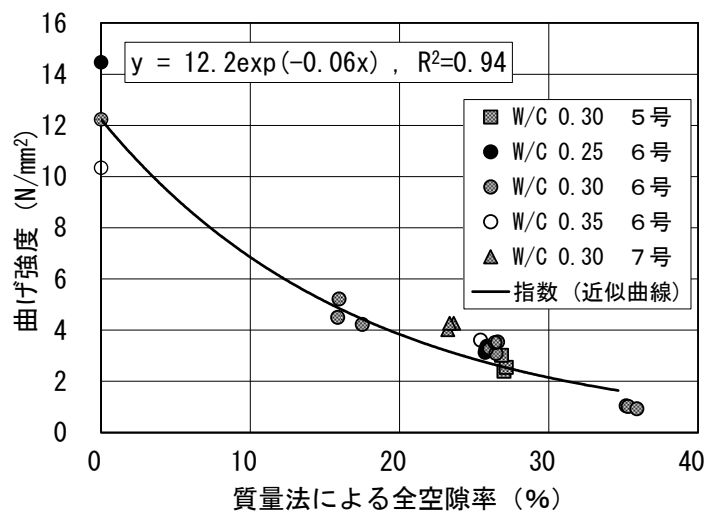


図 3.6 ポーラスコンクリートの曲げ強度と空隙率の関係

### 3.3.4 圧縮強度と曲げ強度の関係

#### (1) ポーラスコンクリート

図 3.7 に、ポーラスコンクリート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<sup>3-4)</sup>で提案されている式(3.1)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<sup>3-3)</sup>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設されたものであり、粗骨材の粒径が大きいほど型枠側面の壁効果による骨材の充填性の低下が顕著となり、側面（曲げ試験時の下端面）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。

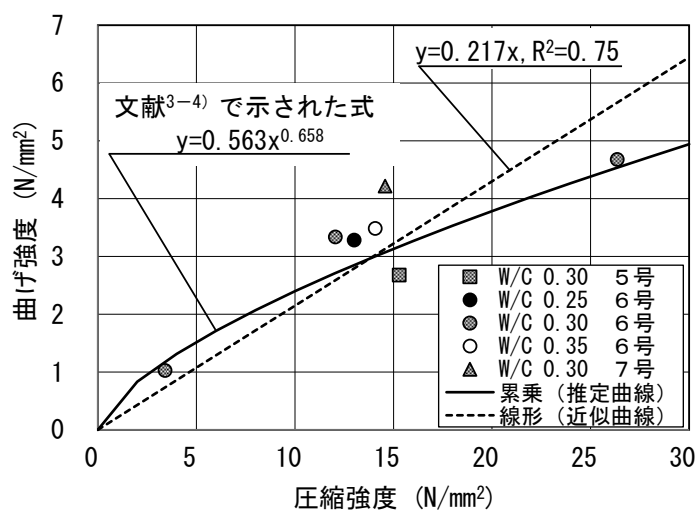


図 3.7 ポーラスコンクリートの曲げ強度と圧縮強度の関係

## (2) セメントペースト

図 3.8 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、ポーラスコンクリート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と線形関数の間にあることが分かる。ただし、ポーラスコンクリート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。

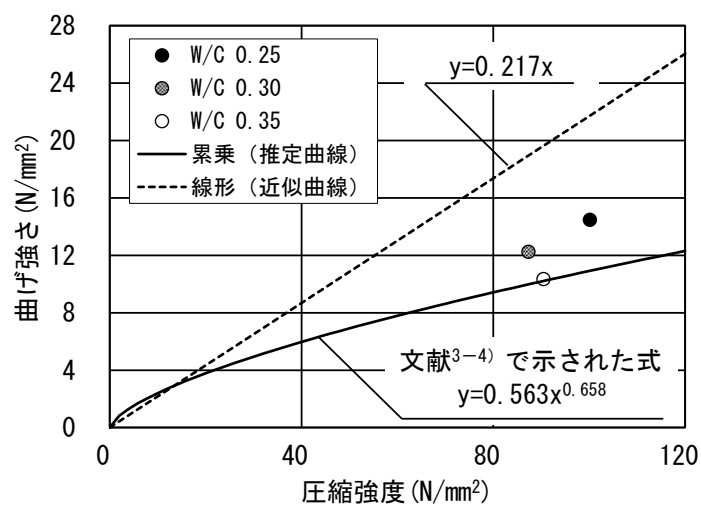


図 3.8 セメントペーストの曲げ強さと圧縮強度の関係

### 3.4 まとめ

本章から得られた知見を以下に示す。

- 1) ポーラスコンクリート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) ポーラスコンクリート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) ポーラスコンクリート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，ポーラスコンクリート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。

**【第3章の参考文献】**

- 3-1) 畑中重光, 三島直生, 森鼻泰大, 中川武志: ポーラスコンクリートの施工標準(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
- 3-2) 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.4-5, 2003.5
- 3-3) ACI COMMITTEE REPORT : 522R-10 Report on Report on Pervious Concrete, P.9, 2010.3
- 3-4) 梶尾聡, 國府勝郎, 上野敦, 宇治公隆: 舗装用ポーラスコンクリート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
- 3-5) 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.191-194, 2015.6
- 3-6) 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
- 3-7) 前川明弘, 山本晃, 三島直生, 畑中重光: 小粒径ポーラスコンクリートの空隙率の測定方法に関する研究, 第60回セメント技術大会講演要旨, pp.218-219, 2006
- 3-8) 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

## 第4章 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

### 4.1 はじめに

前章で述べたように，ポーラスコンクリート舗装の品質評価には，できれば現場施工時に型枠試験体に打ち込まれた試験体（型枠試験体）を用いて現場のポーラスコンクリートの強度を推定するという代替手法の提案が望まれている。

本章では，歩道および建物外構を想定したポーラスコンクリート舗装を，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，現場施工されたポーラスコンクリート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 実験方法

#### 4.2.1 実験の要因と水準

表 4.1 に，実験の要因と水準を示す。ポーラスコンクリート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 4.1 に示す仕上げ機（市販のタンパーの底板を拡張したもの）の通過回数（1 回，4 回）の 3 水準とした。

表 4.1 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：43.0kg  
 転圧板面積：0.17m<sup>2</sup>  
 起振力：4.9kN  
 振動数：91.7Hz

写真 4.1 本実験で使った仕上げ機



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、締固まり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  $1\text{m}^3$  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。碎石路床は地盤上に厚さ 100mm の 6 号碎石および 7 号碎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、 $W/C = 0.62$ ,  $s/a = 46\%$ , 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。上部のポーラスコンクリート舗装（厚さ 100mm）の施工は、上記路床の施工の 1 週間後とした。表 4.2 および図 4.1 に、施工区画と要因・水準の組合せを、写真 4.2 に完成した路床の様子を示す。ここで、表 4.2 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<sup>4-2)</sup>と文献<sup>4-3)</sup>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 (No2 から No7) は、文献<sup>4-2)</sup>の実測値に参考して予測した。コテ仕上げの場合 (No1) は、文献<sup>4-3)</sup>のコテ仕上げの場合は仕上げ機を 1 回通過した場合と同値になった結果により、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違いを省略した条件で予測されている。

表 4.2 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				碎石
5				改良土
6				
7	24	45	仕上げ機 4 回	改良土

[注] \*: 文献<sup>4-2)</sup>, 文献<sup>4-3)</sup>を参考に算出



写真 4.2 完成した路床の様子 (手前が No7)

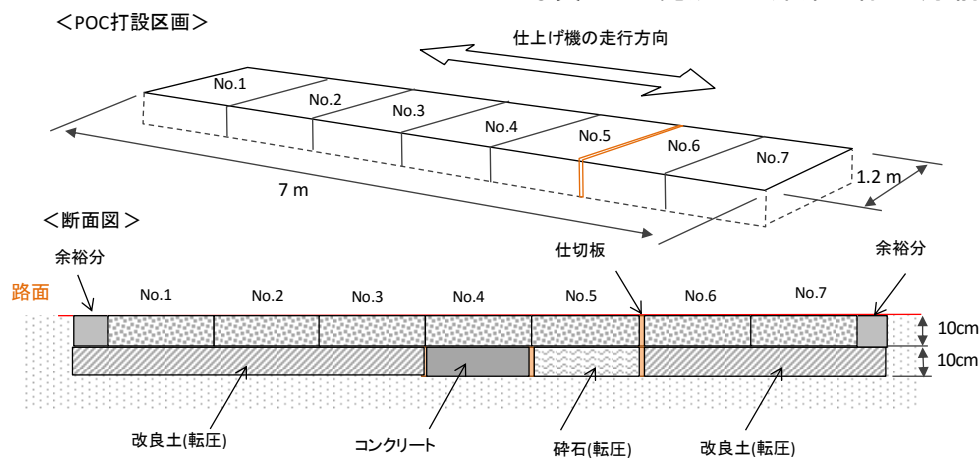


図 4.1 施工区画と要因・水準の組合せ

#### 4.2.2 使用材料および調合

ポーラスコンクリートの使用材料として、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（実積率：58.2%）を用いた。細骨材は使用していない。表 4.3 に、ポーラスコンクリートの調合表を示す。ここで、表中の設計空隙率とは、ポーラスコンクリート中の粗骨材が実積率まで充填された場合の空隙率を指す。

表 4.3 ポーラスコンクリートの調合表

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

#### 4.2.3 試験体の作製方法

ポーラスコンクリートの練混ぜは、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、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 に、ポーラスコンクリートの練混ぜの様子を示す。



写真 4.3 油圧ショベルによるポーラスコンクリートの練混ぜの様子

練上がったポーラスコンクリートは、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 4.1 を参照）。

舗装以外に、各ポーラスコンクリートの調合に対して、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、ジグギン

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。

ポーラスコンクリート以外に、ポーラスコンクリート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 ( $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ ) および円柱体 ( $\phi 50 \times 100\text{mm}$ ) 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、セルローズ系増粘剤をセメント質量に対して 0.5% 添加している。

ポーラスコンクリート舗装の養生は、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 本はポーラスコンクリート舗装の横で屋外暴露養生とした。

ポーラスコンクリート舗装からは、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、角柱切り出し試験体 ( $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ ) および円柱コア試験体 ( $\phi 100 \times 100 \sim 120\text{mm}$ ) を、各条件に付き 3 本ずつ採取した。写真 4.4 に、角柱試験体の切出しの様子を示す。試験体の採取時には、コテ仕上げの水準 (表 4.2 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。採取されたコア試験体の例を写真 4.5 に示す。



(a) 角柱試験



(b) 円柱試験

写真 4.4 POC 舗装からの試験体の採取の様子



(a) No. 1 (コテ仕上げ)



(b) NO. 3 (仕上げ機 1 回)

写真 4.5 POC 舗装から採取されたコア試験体の例



#### 4.2.4 試験方法

##### (1) 空隙率試験

硬化後のポーラスコンクリート試験体については、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）<sup>4-4)</sup>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）<sup>4-4)</sup>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。なお、質量法では全空隙率が測定される。

また、施工直後のポーラスコンクリート舗装から直接空隙率を測定する新しい方法として、フレッシュ状態のポーラスコンクリート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、 $\phi 120 \times 140\text{mm}$  および  $\phi 150 \times 140\text{mm}$  の 2 種類の鋼管をフレッシュポーラスコンクリート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ポーラスコンクリートを採取して質量を計測するとともに、鋼管内部のポーラスコンクリートのかさ容積（舗装厚さ $\times$ 鋼管内部断面積）を計測し、質量法で空隙率



(a) 型枠振動機による鋼管の打ち込み



(b) フレッシュポーラスコンクリートに打ち込まれた鋼管



(c) 鋼管内部の試料の採取後



(d) 採取されたフレッシュポーラスコンクリート

写真 4.6 現場施工されたフレッシュ POC の空隙率試験の様子

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ポーラスコンクリートから出ている高さの差として計測した。

測定対象は、ポーラスコンクリート舗装の No.1, 2, 7 とした。測定数は、各径の鋼管を 1 本ずつとした。写真 4.6 に測定の様子を示す。

## (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、試験体の高さと直径の比 ( $H/D$ ) が 1.0~1.2 程度となったため、既報<sup>4-5)</sup>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 実験結果とその考察

#### 4.3.1 試験体のセメントペーストの垂れの状況

写真 4.7 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た。ただし、ポーラスコンクリート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。

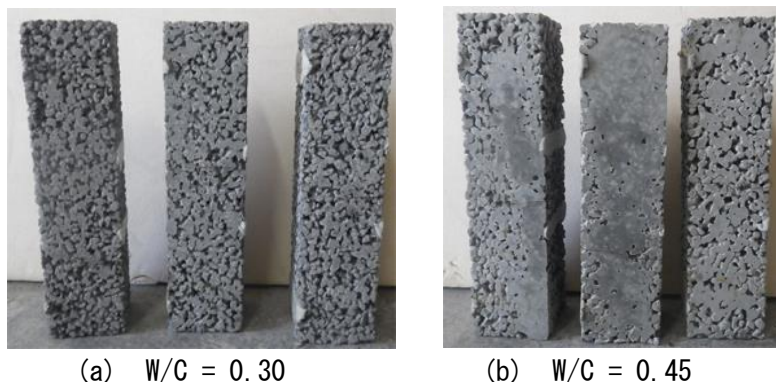


写真-7 型枠試験体の底部のセメントペーストの垂れの状況

#### 4.3.2 空隙率

##### (1) フレッシュポーラスコンクリートの現場空隙率

図 4.2 に、フレッシュポーラスコンクリート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。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ポーラスコンクリート表面が盛り上がってしまうため、舗装厚さ

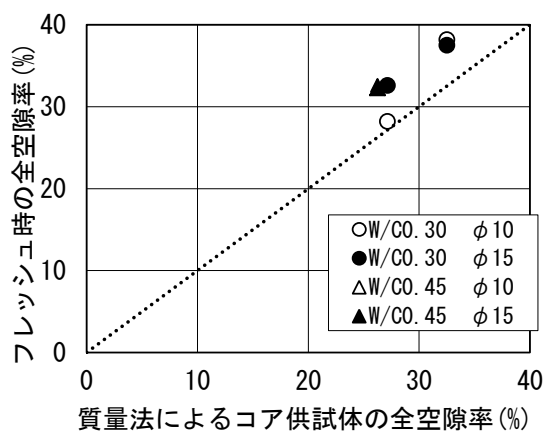


図 4.2 フレッシュ時の現場空隙率試験結果とコア試験体の質量法による空隙率試験結果の比較

を過大評価したこと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、本方法は施工後のポーラスコンクリート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、鋼管を抜きポーラスコンクリート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、鋼管打込み部周囲の盛り上がりを見直し補正する必要がある。

## (2) 硬化ポーラスコンクリートの空隙率

図 4.3 に、硬化ポーラスコンクリート試験体を用いて、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 4.2 に示した目標空隙率を $\pm 5\%$ の範囲内で満足している。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り、単位容積あたりの骨材容積が減少し、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。

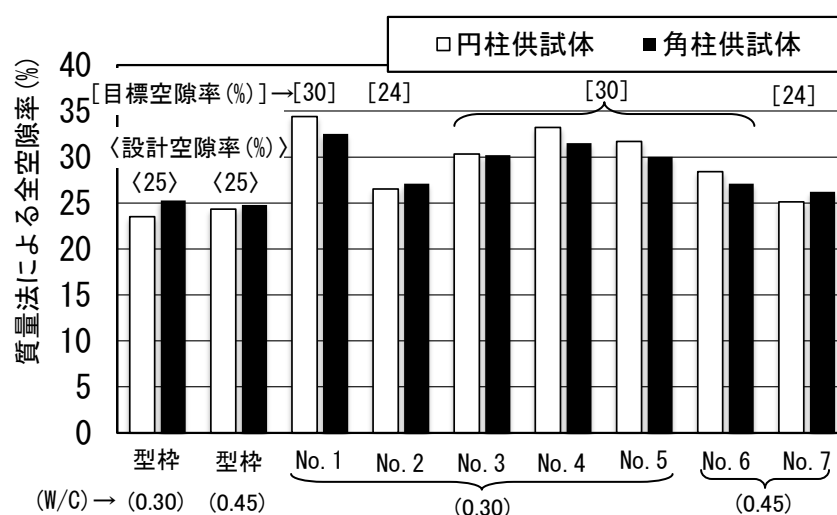


図 4.3 質量法による全空隙率の測定結果

図 4.4 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数%程度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。

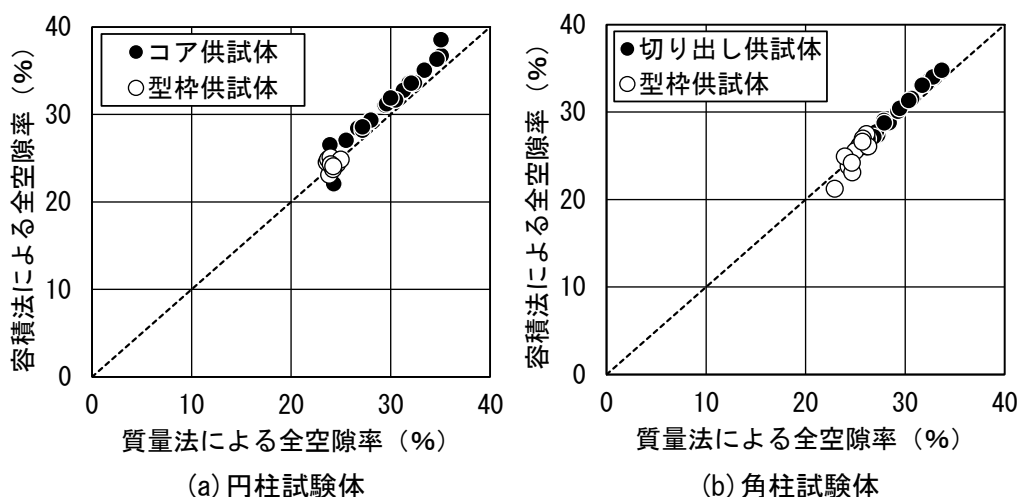


図 4.4 容積法と質量法による全空隙率

#### 4.3.3 圧縮強度

図 4.5 にセメントペーストの、図 4.6(a), (b) にポーラスコンクリート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 4.6(a) 中には、型枠試験体の結果を既報<sup>4-5)</sup>で提案されたポーラスコンクリートの圧縮強度(y)－空隙率(x)の関係式（累乗指数は 0.08 で固定）で近似した曲線も併示した。近似曲線の y 切片は、図 4.5 に示すセメントペーストの圧縮強度とすべきであるが、今回の実験結果が既報などで得られている結果と比べて低い強度となっているため、ここではポーラスコンクリートの暴露養生の結果のみを用いて最小二乗法による近似を行った。図 4.6(a) には、比較のために第 3 章のデータも示した。セメントペーストの圧縮強度試験結果が、低くなった原因としては、自己収縮や乾燥収縮などの影響により内部に欠陥が生じ、セメントペーストの強度が低く評価された可能性がある。

図 4.6(b) 中には、図 4.6(a) で得られた型枠試験体による圧縮強度－空隙率関係曲線も併示する。ポーラスコンクリートの圧縮強度に及ぼす W/C の影響に着目すると、W/C=0.45 と 0.30 の圧縮強度の差はわずかであった。

図 4.6(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 4.6(b) によれば、型枠試験体から得られた関係式とコア試験体の実験結果は比較的近い曲線上にあると見ることができる。



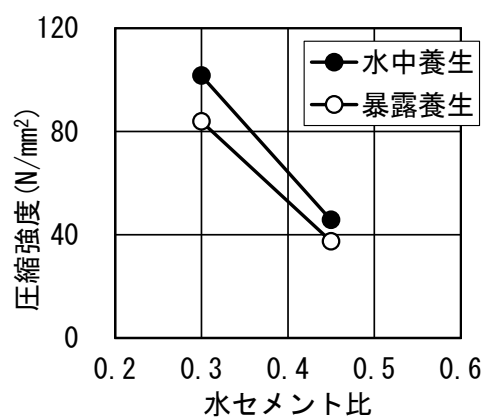


図 4.5 セメントペーストの圧縮強度試験結果

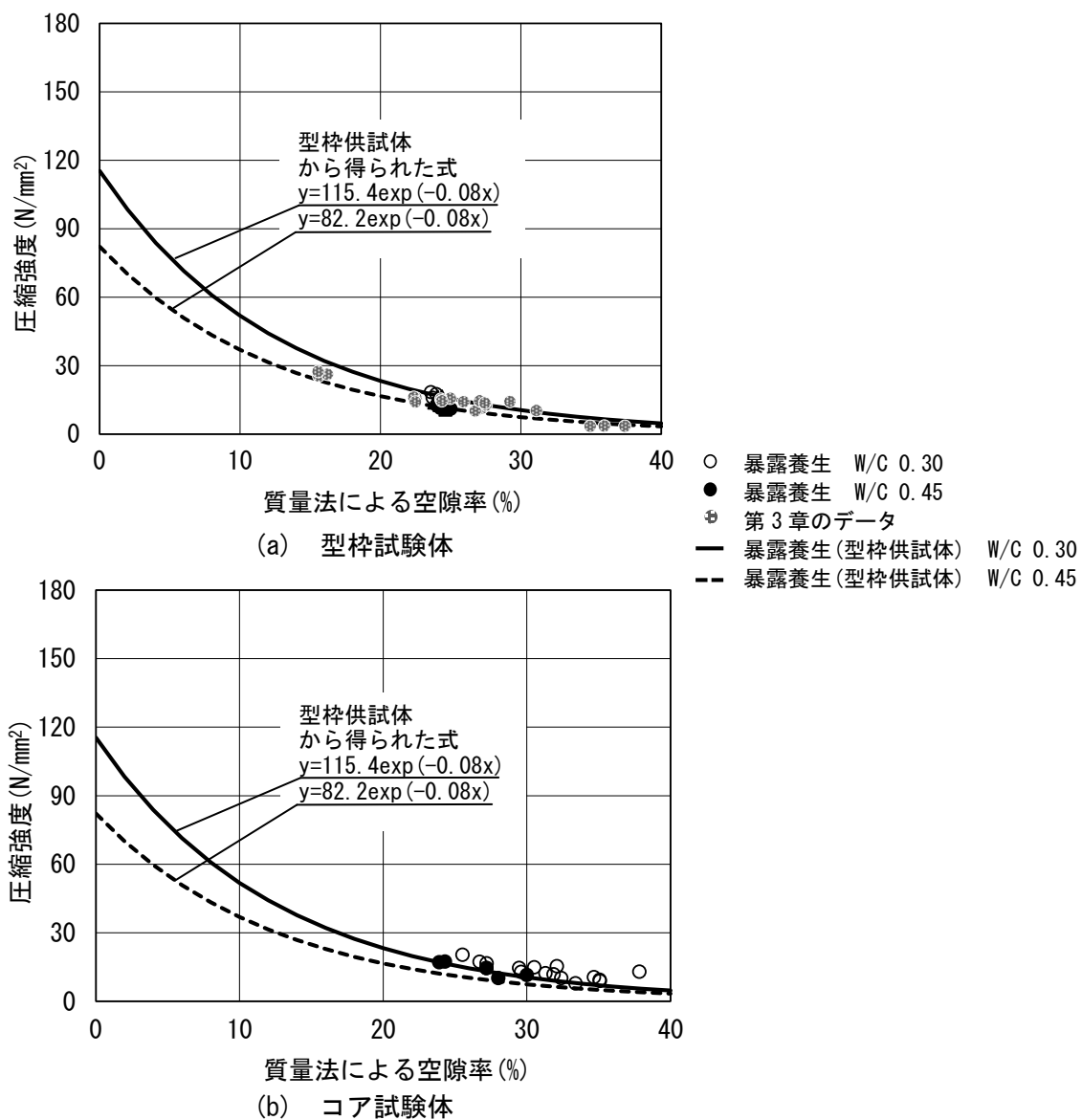


図 4.6 ポーラスコンクリートの圧縮強度と全空隙率の関係

#### 4.3.4 曲げ強度

図 4.7 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、第 3 章で示した同一調合のセメントペーストの試験結果 ( $W/C = 0.30$  のセメントペーストで  $12.2\text{N/mm}^2$ ) と比べて非常に小さい値となった。養生段階での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。

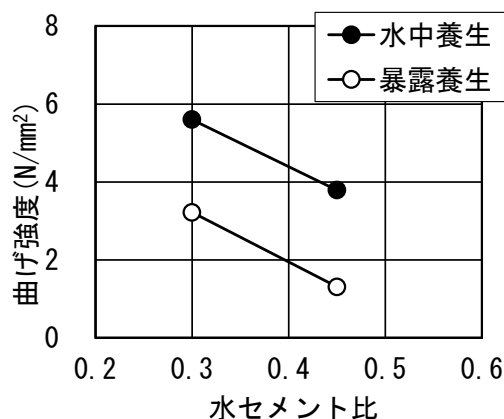


図 4.7 セメントペーストの曲げ強度試験結果

図 4.8(a), (b) に、ポーラスコンクリートの型枠試験体および切出し試験体の曲げ強度試験結果を示す。図 4.8(a) に示す型枠試験体の結果からは、暴露養生の結果を用いて曲げ強度－空隙率関係曲線を最小二乗法により近似した曲線も示す。ここで、 $y$  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、ポーラスコンクリートの暴露養生の結果のみを用いて最小二乗法による近似を行った。ここで、近似曲線の累乗指数は、第 3 章の実験結果から得られた値である  $0.058$  で固定して近似した。これらの図によれば、ポーラスコンクリートの曲げ強度は、型枠試験体および切出し試験体共に、既報で得られた近似曲線よりも若干低くなる傾向がある。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 4.8(b) によれば、切出し試験体の曲げ強度は、ばらつきはあるものの型枠試験体から得られた曲げ強度と空隙率の関係曲線にほぼ一致している。

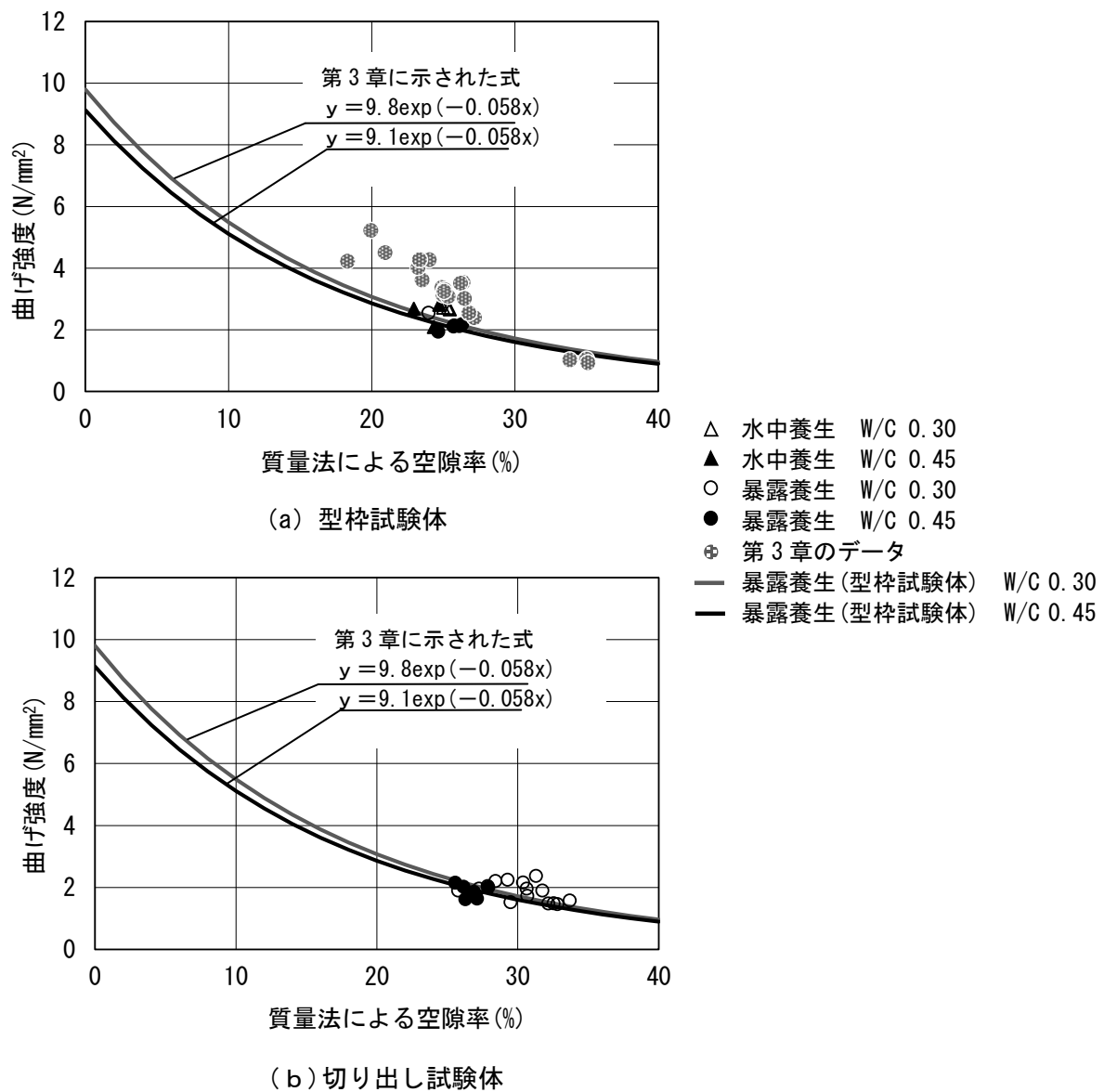


図 4.8 ポーラスコンクリートの曲げ強度と全空隙率の関係

#### 4.3.5 空隙率と圧縮/曲げ強度の関係

以上より、同一調査、同一養生条件であれば、現場ポーラスコンクリート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、事前に締固め方法を決定して作製された型枠試験体の強度—空隙率関係と関連付けることができそうであり、現場のポーラスコンクリート舗装の空隙率が得られれば、現場ポーラスコンクリート舗装の強度（圧縮、曲げ）をおおむね推定できるといえる。

#### 4.4 まとめ

本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- 1) 本実験では、施工後のポーラスコンクリートの空隙率を迅速に測定するため、鋼管を用いたフレッシュポーラスコンクリートの空隙率測定方法を提案した。
- 2) 現場施工されたポーラスコンクリート 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。
- 3) 本実験だけでは必ずしも明解ではないが、同一調合、同一養生条件であれば、型枠試験体と現場ポーラスコンクリート 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、事前に型枠試験体の強度—空隙率関係から仮定できそうである。
- 4) 調合設計上の空隙率に各締固め方法の影響を考慮して、現場のポーラスコンクリート 舗装の空隙率を推定することで、現場ポーラスコンクリート舗装の強度（圧縮、曲げ）をおおむね推定できるといえる。今後、より広範囲の空隙率についてデータを収集して、精度を高めたい。

**【第4章の参考文献】**

- 4-1) 畑中重光, 三島直生, 森鼻泰大, 中川武志: ポーラスコンクリートの施工標準(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
- 4-2) 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.33, No.1, pp.1481-1486, 2011
- 4-3) 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
- 4-4) 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) 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
- 4-6) 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

## 第5章 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

### 5.1 はじめに

第3章および第4章で述べた品質評価方法は、道路に使用されるポーラスコンクリート舗装を施工する際に型枠に打ち込まれた試験体を用いて、その品質を評価するための研究であり、結果によれば、圧縮強度と曲げ強度は空隙率と強度関係式を用いて推定が可能であるに対し、空隙率の推定は困難であった。ポーラスコンクリートにとって空隙率は非常に重要な特性であり、空隙率が分かれば、その他の各各種の品質を知ることができる。したがって、実際におけるポーラスコンクリートの品質管理に対しては、現場での空隙率推定方法の提案が非常に重要となる。第2章の既往の研究で説明したように、ポーラスコンクリートの空隙率と超音波伝播速度は相関があるとする既往研究<sup>5-3), 5-5)</sup>があり、超音波伝播速度と空隙率の関係を求めることができれば、非破壊試験による空隙率の推定は可能となると考えられる。

本章では、第3章に示したポーラスコンクリートの曲げ強度試験後の角柱試験体を用いて、超音波伝播速度の測定を行い、その結果から、空隙率と超音波伝播速度の関係、およびその結果に及ぼす要因について検討する。

## 5.2 実験Ⅰ 超音波伝播速度法によるポーラスコンクリートの空隙率推定に関する実験

### 5.2.1 実験方法

#### (1) 実験の要因と水準

表 5.1 に、本実験の要因と水準を示す。本実験では、ポーラスコンクリート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合要因とし、その他の要因としては、発受振子と試験体との間のグリスの使用量および超音波伝播速度の測定時の試験体の水分状態を取り上げた。

表5.1 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
グリスの量	なし, 少ない, 充分
水分状態	乾燥、湿潤

[注]    : 基本水準を示す

#### (2) 使用材料および調合

ポーラスコンクリート試験体としては、第 3 章で使用した曲げ強度試験体の曲げ試験により 2 割分されたものを使用した。ポーラスコンクリートの使用材料および調合に関しては、第 3 章に参考されたい。

#### (3) 試験体の作製方法

ポーラスコンクリートの試験体の作製方法に関しては、第 3 章に参考されたい。

ポーラスコンクリートの試験体とは別に、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、ポーラスコンクリートで使用した砕石と同様の岩石（岩類：南伊勢町産硬質砂岩）を整形した作製した。超音波測定方法のうち、対面法に対してはコア試験体（ $\phi 50 \times 100$  mm）とし、表面法に対しては測定面として  $150 \times 50$  mm の平面を確保するためにコンクリートカッターで切断をカットした表面法用の試験体を 3 本ずつ用いた。対面法用にセメントペースト試験体は、水セメント比 0.3 の円柱試験体（ $\phi 50 \times 100$  mm）を 3 本作製した。いずれのコア試験体も端面研磨仕上げとした。写真 5.1 には、試験体の例を示す。ここで、(a)のポーラス

コンクリート試験体にあるキャッピングは曲げ強度試験用のものである。



(a) ポーラスコンクリート (100×100×400mm)



対面法用 (φ50×100mm) 表面法用 (測定距離: 100mm)

(b) 整形した岩石



(c) セメントペースト

写真 5.1 試験体の例

#### (4) 試験方法

##### :) 空隙率試験

ポーラスコンクリート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ポーラスコンクリートの空隙率試験方法 (案) ④を参考として行った。詳しい内容について第3章を参照されたい。

##### ::) 超音波伝播試験

本実験では、試験装置としてコンクリート用超音波伝播速度測定装置(PUNDIT)を用いた。同試験装置は、発振子から受振子までの間の超音波パルス (縦波・P波) の到達時間を計測するためのものであり、コンクリート表面に両端子を密着させることでコンクリート中の超音波パルスの伝播時間が得られる。本試験装置では、超音波パルスの周波数として、コンクリートに適しているとされる 50kHz を用い、伝播時間の分解能は 1μs とした。一般に



端子間の距離を計測してコンクリート中を伝播する超音波パルスの伝播速度を算出し、強度および欠陥の検出などが行われる。

図 5.1 に、ポーラスコンクリート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。超音波伝播速度測定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。測定方法としては、超音波伝播速度測定方法の対面法および表面法を用いた。

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-R<sub>1</sub>, 4-R<sub>2</sub>)で測定を行った。

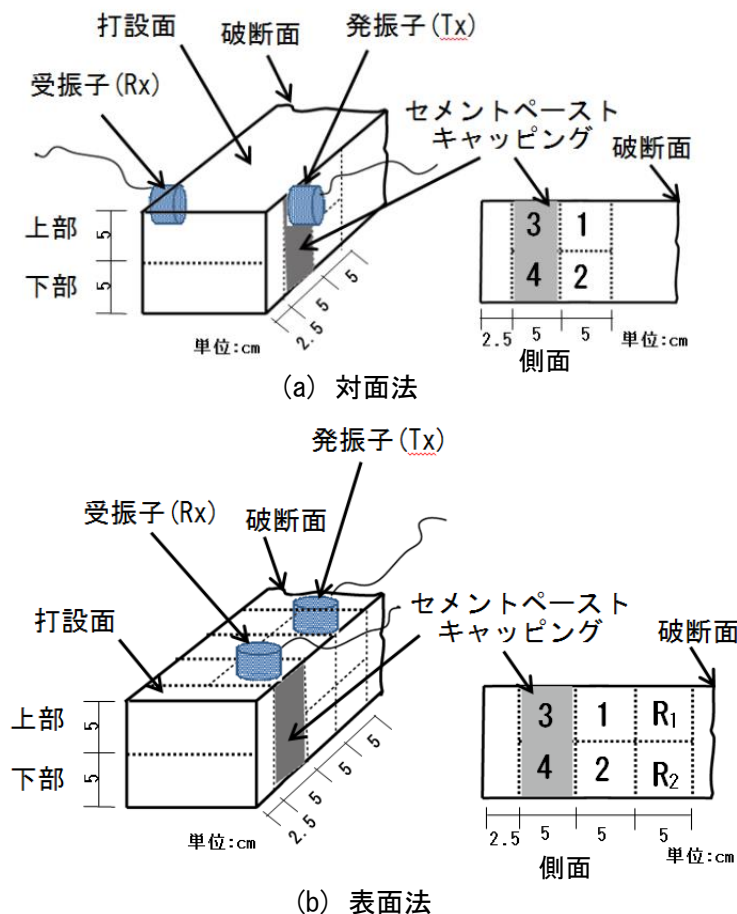


図 5.1 超音波伝播速度の測定方法

測定は、同じ位置に対して三回実施し、各測定位置（対面法は試験体側面 1~4 の 4 通り、表面法は試験体打込み面、側面および底面の各面で 3-R<sub>1</sub>, 4-R<sub>2</sub> の 2 通り）の平均値により試験体における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、グリスを接触媒質として用いた。

本実験ではグリスの使用量も要因とした。写真 5.2 にグリスの使用量のイメージを示す。グリスなしとは、発振子および試験体接触面の両側に全くグリスを付着させないとし、グリス少量とは、測定前の時点で発振子側のみグリスを付着させた状態とし、グリス多量とは、測定前の時点で発振子と試験体接触面の両側にグリスを付着させた状態とした。受振子側は、発振子側と同量のグリスを用いた。

また、実験要因である水分状態については、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。

ポーラスコンクリートの試験体とは別に、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、 $\phi 50$  mm の円柱試験体を用いて、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。



写真 5.2 測定前の接触面のグリスの使用量  
(左:試験体側, 右:発振子)

### 5.2.2 実験結果とその考察

#### (1) 対面法

図 5.2 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伝播速度が大きくなる傾向が見られている。

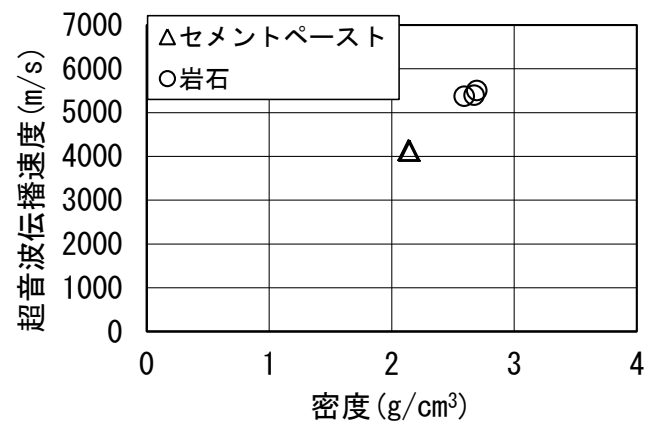


図 5.2 岩石およびセメントの対面法による超音波伝播速度と密度の比較

図 5.3 に、ポーラスコンクリートの空隙率と対面法による超音波伝播速度の関係を示す。

図 5.3(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スの量の影響を実験の全データにより示す。図によれば、グリ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、一般に、超音波伝播速度の測定では、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、グリスを多量に使用することにより、ポーラスコンクリート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スを多量に使用した場合のデータである。

図 5.3(b) に、試験体の水分状態の影響として、湿潤状態および乾燥状態の比較を示す。図によれば、ポーラスコンクリート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-3(b) に示したデータ以外は全て湿潤状態のものをを用いた。

図 5.3(c) に、セメントペーストのキャッピングの影響および試験体の上部と下部の比較を示す。本実験の範囲では、明確な差は見られなかった。

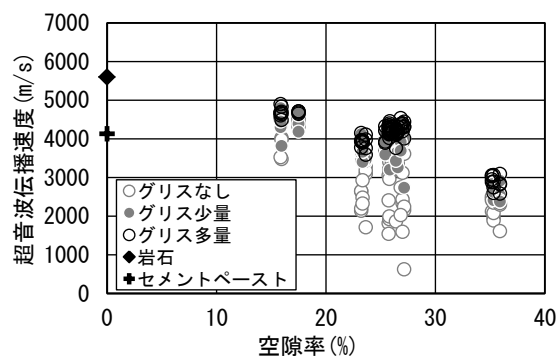
図 5.3(d) に、調合および使用材料の影響を示す。ここに、図 5.2 に示した岩石およびセメントペーストの実測結果は空隙率 0% の位置に示した。また、図中にはポーラスコンクリートの結果のみを用いた線形の近似曲線も示す。図の近似式により求めた対面法による空隙率の推定式を式(2)に示す。

$$VR = (-U + 6374) / 93.9 \quad (2)$$

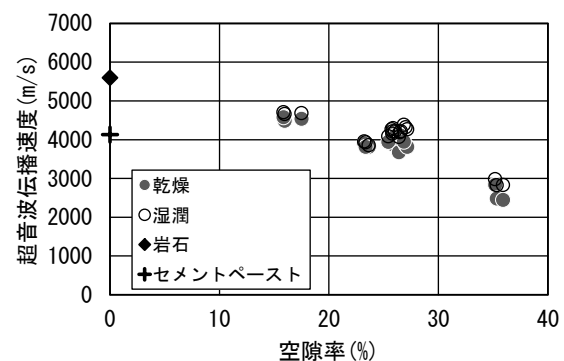
ここに、 $VR$ : 空隙率,  $U$ : ポーラスコンクリートの超音波伝播速度 (m/s)

図によれば、ポーラスコンクリートは、空隙率が大きくなるほど伝播速度が小さくなっている。これは、超音波はポーラスコンクリートの中で空隙以外の部分の一番短い経路により伝播速度が決まること、また、空隙率が大きくなるほど空隙以外の部分の量が減り、通過経路が長くなったことなどの理由によると考えられる。大きくなるほど空隙以外の部分の量が減り、通過経路が長くなったことなどの理由によると考えられる。

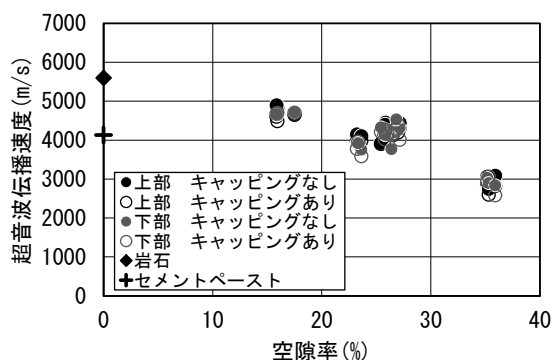
y 切片については、岩石の測定結果に近い値となっている。これは、ポーラスコンクリート内部の超音波伝播経路のほとんどが粗骨材であるためと考えられる。また水セメント比と粗骨材粒径の影響については、本実験結果からは明確な傾向は見られていない。



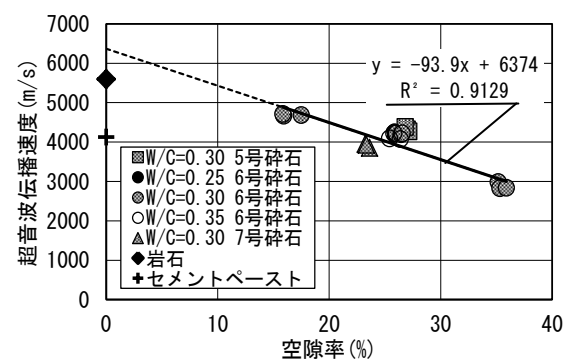
(a) グリス量の影響(全データ)



(b) 乾燥状態と湿潤状態の比較(全データの平均値)



(c) キャッピングの影響と試験体の上下部の比  
(全データの平均値)



(d) 調合および使用材料の影響  
(全データの平均値)

図 5.3 ポーラスコンクリートの対面法による超音波伝播速度と空隙率の比較

## (2) 表面法

図 5.4 に、表面法による超音波伝播速度の測定結果を、試験体の打込み面、側面および底面に分けて示す。ここに、岩石の表面法による伝播速度は空隙率 0% の位置に表示している。また、図中にはポーラスコンクリートの結果のみを用いた線形の近似曲線も示す。図の近似式により求めた表面法による空隙率の推定式を式(3)に示す。

$$VR = (-U + 2262) / 36.6 \quad (3)$$

ここに、 $VR$ ：空隙率， $U$ ：ポーラスコンクリートの超音波伝播速度 (m/s)

図によれば、表面法による超音波伝播速度と空隙率はある程度相関を示しており、図 5.4 (a) の打込み面の場合には、比較的良好な相関を示しており、表面法による超音波伝播速度からも空隙率の推定ができる可能性があると考えられる。

図 5.4 (b) の側面および (c) の底面の場合は、ばらつきが大きい、これは試験体の型枠との壁効果および底面のセメントペーストの垂れの状態によるものと考えられる。

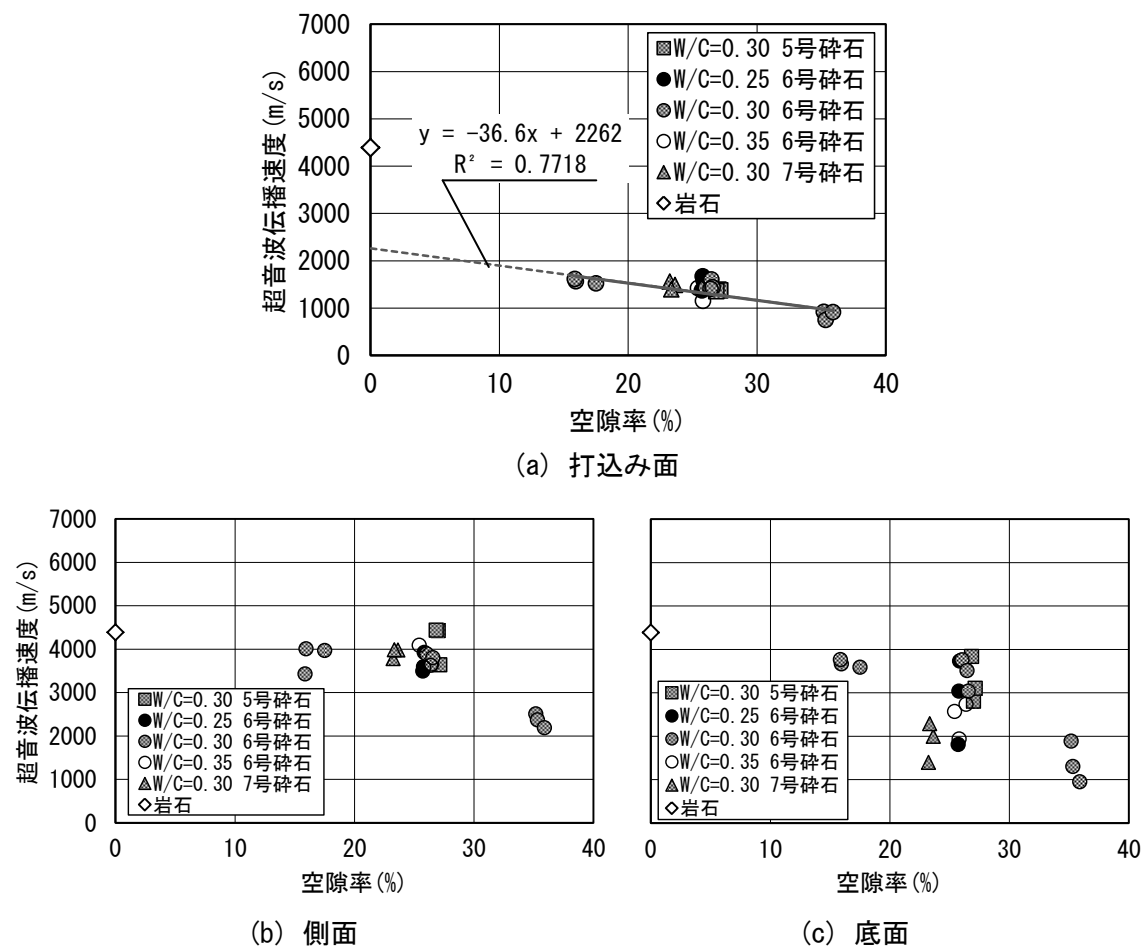


図 5.4 ポーラスコンクリートの表面法による音波伝播速度と空隙率の比較

### (3) 表面法と対面法の比較

図 5.5 には、表面法および対面法による超音波伝播速度の比較を、空隙率のみ変化させた水セメント比 0.3 の 6 号砕石使用の場合のデータを用いて示す。同図には、対面法により得られた岩石および試験体の近似式および打込み面における試験体の表面法による近似式も示す。また、セメントペースト (W/C=0.3) の伝播速度も示してある。

図によれば、対面法による伝播速度が表面法より大きく測定され、空隙率が大きくなるほどその差が小さくなる傾向が見られている。これは、表面法では壁効果の影響により空隙率の大きいポーラスコンクリート表面のみを伝播し伝播経路が伸びるため、およびポーラスコンクリート表面を覆うセメントペーストを伝播する機会が増すためと考えられる。

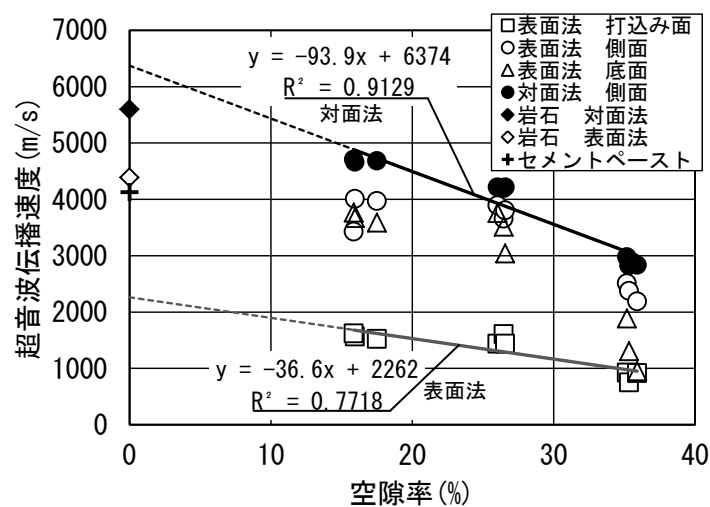


図 5.5 ポーラスコンクリートの対面法と表面法による超音波伝播速度の比較  
(W/C = 0.30, 6号砕石使用)

### 5.2.3 実験Ⅰのまとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- 1) 表面法および対面法による超音波伝播速度の測定により、ポーラスコンクリートの空隙率を推定することは可能であると考えられる。
- 2) 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は、線形関数で近似できる。
- 3) 同一のポーラスコンクリート試験体を用いた測定結果によれば、表面法と比べて対面法の超音波伝播速度が大きくなる。これは、表面法の測定結果に及ぼすポーラスコンクリート試験体表面の壁効果の影響と考えられる。
- 4) ポーラスコンクリートの超音波伝播速度は、接触媒質として使用されるグリス量による影響が大きく、実験する際に、グリスを充分用いる必要がある。
- 5) ポーラスコンクリートの超音波伝播速度に及ぼす、試験体の水分状態、水セメント比、セメントキャッピングの有無、粗骨材粒径、の影響は小さい。



### 5.3 実験Ⅱ 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ンシートの適用性について基本的研究

前節 5.2 の結果からは、ポーラスコンクリートの超音波伝播速度の測定は、発・受振子と試験体との密着度を安定的に得ることが難しく、超音波伝播速度の測定時には、接触媒質としてグリスを十分に用いる必要があることが明らかとなった。しかし、ポーラスコンクリートにグリスを多量に用いた場合には、空隙内にグリスが入り込み、洗浄および除去が非常に困難となるため、実用化にむけてはより作業性のよい他の接触媒質が求められる。

このため本節（実験Ⅱ）では、接触媒質として硬度の異なるシリコンシートを用い、空隙率を変化させたポーラスコンクリートの超音波伝播速度試験を行い、空隙率の推定精度について検討を行う。

#### 5.3.1 実験方法

##### (1) 実験の要因と水準

表 5.2 に、本実験の要因と水準を示す。本実験では、ポーラスコンクリートの空隙率を調合要因とし、その他の要因としては、発・受振子と POC の間に接触媒質として設置するシリコンシートの種類を取り上げた。シリコンシートの硬度は、 $8^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $50^{\circ}$  を使用し、厚さは、1mm を用い、2mm と 3mm の厚さは 1mm 厚を重ねて使用した。また、硬度  $50^{\circ}$  については 3mm 厚のシリコンシートも用い、1mm 厚のシリコンシートを重ねた場合の影響についても検証した。

表5.2 実験の要因と水準

要因		水準
設計空隙率(%)		15, 25, 35
シリコンシート 種類	硬度( $^{\circ}$ )	8, 30, 50
	厚さ(mm)	1, 2, 3

##### (2) 使用材料および調合、試験体の作製方法、および試験方法

ポーラスコンクリートの使用材料および調合、試験体の作製方法、および試験方法については、前節の実験Ⅰを参照されたい。

ただし、超音波伝播試験の試験方法は実験Ⅰと一部が異なる。実験Ⅰとの相異点は、試験機の発振子( $\phi 50 \times 50 \text{mm}$ )および受振子( $\phi 50 \times 50 \text{mm}$ )と試験体の接触面には、シリコンシートを接触媒質として用いた。また、発・受振子の押付け力については、60KN～80KN 程度とした。



### 5.3.2 実験結果とその考察

#### (1) シリコンシート

図 5.6 には，シリコンシートのための硬度と超音波伝播速度との関係に及ぼすシリコンシートの厚さの影響を示す。まず，硬度の影響については，真ん中の水準である  $30^\circ$  で最大となっている。また，シリコンシートの硬度によらず厚さが大きくなるほど超音波伝播速度が速くなる傾向が見られている。厚さ 3mm の 1 枚では厚さ 1mm を 3 枚重ねた場合より伝播速度が少し大きくなった。

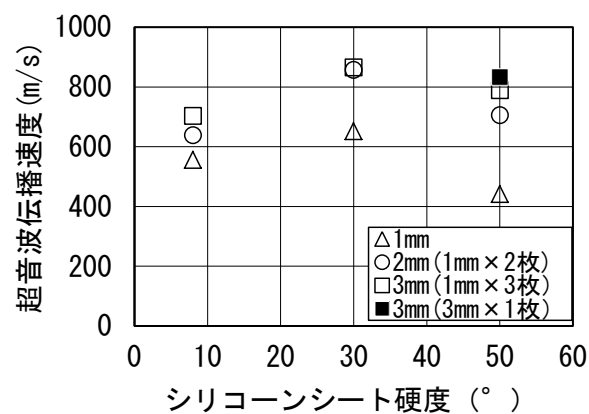


図 5.6 シリコンシートの超音波伝播速度と硬度の関係

## (2) 岩石

図 5.7 には、岩石の超音波伝播速度におけるシリコーンシートの硬度の影響を 3 本の岩石試験体に対する結果の平均値により示す。また、シリコーンシートのみ結果（図 5.6）を用いて、シリコーンシート中を伝播した時間を差し引いて計算した岩石の超音波伝播速度を補正後として示す。図によれば、シリコーンシート中の伝播時間を差し引くことにより、シリコーンシートの厚さの影響をほぼなくすることが可能であることが確認された。硬度の影響については、硬度が大きくなるほど速度が低下する傾向がみられている。これは、硬度が上がることにより発・受振子と試験体との密着度が低下することによると考えられる。

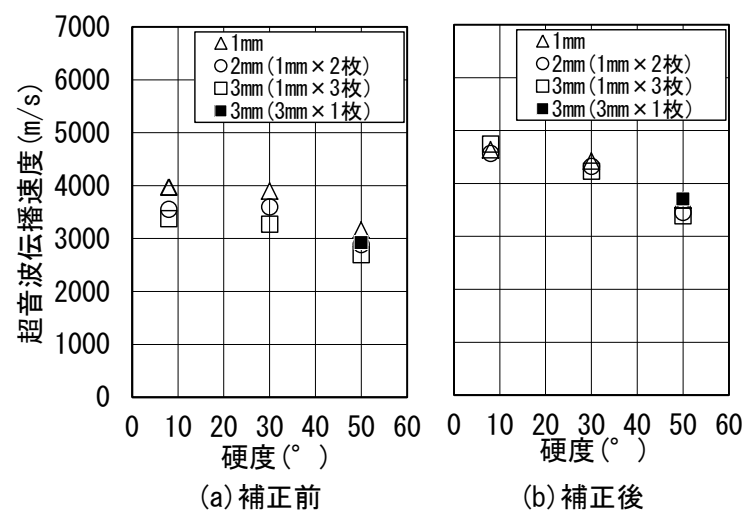


図 5.7 岩石の超音波伝播速度とシリコーンシートの硬度の関係

### (3) ポーラスコンクリート

図 5.8 には、ポーラスコンクリートの超音波伝播速度と接触媒質として使用されたシリコーンシート hardness の関係を異なる 3 水準の空隙率に分けて示す。ここに、超音波伝播速度は、図 5.7 と同様に補正した。図によれば、いずれもシリコーンシートが硬くなるほど速度が小さくなる傾向が見られている。また、厚さの影響については、岩石と同様に明確な差は見られなかった。ここで、超音波伝播速度が速い方が密着度が良好であり、接触媒質としては適すると判断できるため、上記の実験結果から判断すると、本実験の範囲では、ポーラスコンクリートの超音波伝播速度の測定に用いる接触媒質としてのシリコーンシートは、厚みは 1mm で硬度は 8° のものが測定精度およびコストの面から優れていると判断できる。

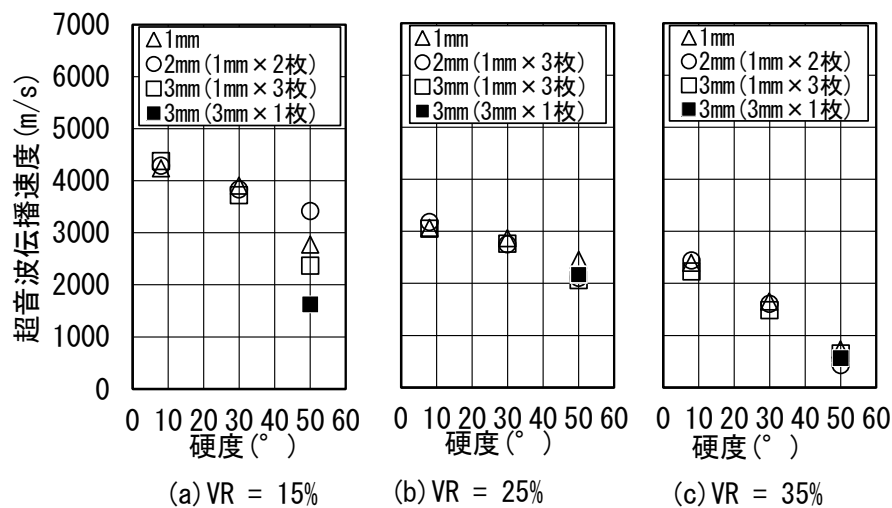


図 5.8 ポーラスコンクリートの超音波伝播速度とシリコーンシートの硬度の関係

図 5.9 には、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平均値により示す。ここに、シリコーンシート(硬度 8°)を使用した場合とグリスを使用した場合のそれぞれの近似式も示す。シリコーンシートの近似式は、硬度 8°, 厚さ 1mm のデータにより近似した。また、図 5.6 に示した硬度 8°, 厚さ 2mm のシリコーンシートを用いた岩石の結果と、グリスを用いた岩石の結果を空隙率 0% の位置に示す。図によれば、シリコーンシートを用いた場合にも、ポーラスコンクリート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グリスを使用した場合と同様に線形式により近似可能であると考えられる。また、グリスを使用した結果との比較からは、シリコーンシートの方が超音波伝播速度が多少小さくなった。

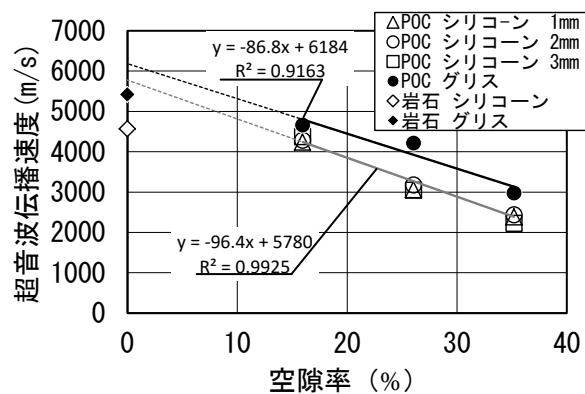


図 5.9 ポーラスコンクリートの空隙率と超音波伝播速度の関係

### 5.3.3 実験Ⅱのまとめ

本実験の範囲では以下の知見が得られた。

- 1) ポーラスコンクリートの超音波伝播速度は、接触媒質として使用されるシリコーンシートの硬度が小さくなるほど、軟らかくなるほど大きくなる。
- 2) ポーラスコンクリートの超音波伝播速度には、シリコーンシート中の伝播時間を差し引いて補正することにより、厚さの影響を除去することが可能である。
- 3) 本実験結果からは、硬度 8°, 厚さ 1mm のシリコーンシートが測定精度およびコストの面から優れていると判断でき、適切なシリコーンシートを使用することにより、ポーラスコンクリートの超音波伝播速度の測定の簡便化は可能である。

**【第 5 章の参考文献】**

- 1) 畑中重光, 三島直生, 森鼻泰大, 中川武志: ポーラスコンクリートの施工標準(案)の作成に向けて, コンクリート工学, Vol.49, No.4, pp.30-37, 2011.
- 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会, pp.186-190, 2015.6
- 3) 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
- 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
- 5) 石黒 覚, 伊藤果穂, 工藤舞子: 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

## 第6章 ポーラスコンクリートにおける超音波伝播速度のモデル解析

### 6.1 はじめに

前章では、ポーラスコンクリートと超音波伝播速度の関係は、概ね直線で近似することができた。しかし、既往の研究<sup>6-1)</sup>には円柱試験体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は二次関数で近似されているものもあり、これは実験の条件による違いか、他の要因によるものであるか不明である。

そこで本章では、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、実験の要因および状況による違いが生じない理論的検討を行う目的で、文献<sup>6-2)</sup>に示された骨材の実積率と最も近い斜方格子モデルを用いて簡易な二次元解析を行い、その結果を本研究および既往の研究<sup>6-3)</sup>の実測値による結果と比較検討を行った。

### 6.2 解析の概要

#### 6.2.1 解析モデルの選定根拠

図 6.1 に、本解析で用いたモデルを示す。粗骨材の配列モデルとしては、実際の粗骨材の実積率（58.1%）に近くなる斜方格子配列（図 6.1(a) 参照）を採用した。斜方格子配列には異方性があり、汎用的な結果を得ることは困難であるが、本論文では空隙率と超音波伝播速度の定性的な関係を得ることを目的とした一考察として位置づけて検討を進める。

図 6.1(b) には、斜方格子内部の球体 1 個分を含む領域で構成される単位要素を示すが、図から明らかなように、斜方格子配列では断面によって固相の占める面積が大きく異なるため、2次元解析を行う上では対象とする断面の選択が結果に大きく影響する。

本研究で対象としている超音波伝播速度の測定に関しては、その基本特性として最も速く伝播する経路の結果が測定される。この点を考慮すると、固相の面積割合が最大となる面として、図 6.1(b) に斜線で示す断面を解析の対象断面とすることとした。

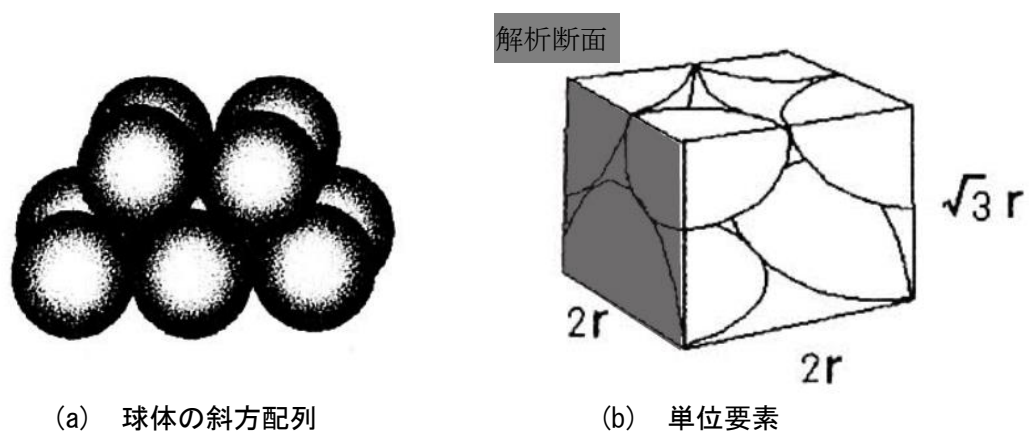


図 6.1 斜方格子モデル（実積率：60.5%）

## 6.2.2 解析方法

### (1) 空隙率の算定方法

解析モデルで仮定したポーラスコンクリート空隙率は、斜方格子配列の球体で表される粗骨材表面に、一定厚さ  $t$  でセメントペーストが付着した状態を想定し、3次元で固相容積（粗骨材+セメントペースト）とかさ容積の差から空隙容積を計算して、ポーラスコンクリートの空隙率を求めた。セメントペースト量の算定で問題となる、粗骨材間のセメントペースト容積の処理方法は、図 6.2 および式 (6.1) に示す文献<sup>6-2)</sup>の方法を採用した。

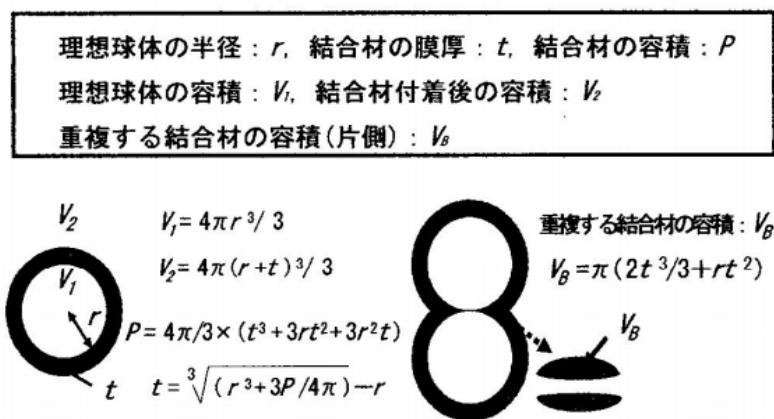


図 6.2 重複するセメントペーストの容積の計算方法

$$V_R = (V - V_G - V_C) / V \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned}
 \text{ここに, } V &= 2r \times 2r \times \sqrt{3}r = 4\sqrt{3}r^3 \\
 V_G &= \frac{4}{3}\pi r^3 \\
 V_C &= V_{CA} - V_{CB} \\
 V_{CA} &= \frac{4}{3}\pi [(r+t)^3 - r^3] \\
 V_{CB} &= 6V_B = 6\pi (2t^3/3 + rt^2)
 \end{aligned}$$

ここに、 $V_R$ ：空隙率(%),  $V$ ：単位要素の全体積( $\text{mm}^3$ ),  
 $V_G$ ：単位要素の骨材容積( $\text{mm}^3$ )  
 $V_C$ ：単位要素のセメントペースト容積( $\text{mm}^3$ ),  
 $V_{CA}$ ：球体の結合材膜容積( $\text{mm}^3$ )  
 $V_{CB}$ ：単位要素の重複する結合材容積( $\text{mm}^3$ )  
 $t$ ：結合材膜厚(mm),  $r$ ：理想球体半径(mm)



## (2) 超音波の伝播経路を仮定した検討

図 6.3 に、解析断面の例を示す。空隙率の違いによりセメントペーストの厚さは変化する。本解析では、同断面の上部から下部への伝播を想定することとした。また、各経路の始点および終点は、上端および下端の中央で固定とした。

本解析では、超音波の伝播経路として、同図中に示した経路 1)～3)の 3 種類について検討した。経路 1)は粗骨材のみを伝播する経路であり、経路 2)は空隙を迂回して粗骨材およびセメントペーストを伝播する経路であり、経路 3)は空隙も含む平面上の最短距離を結ぶ経路である。

各材料の音速を表 6.1 に示す。砕石およびセメントペーストについては第 5 章で得られた実測結果を、空気の伝播速度については文献<sup>6-3)</sup>に示されている式 6.2 に試験時の実験室温度(10.7℃から 14.9℃)の平均値(12.8℃)を代入して算出された。式 6.3 から式 6.5 に、各経路における超音波伝播速度の算定式を示す。

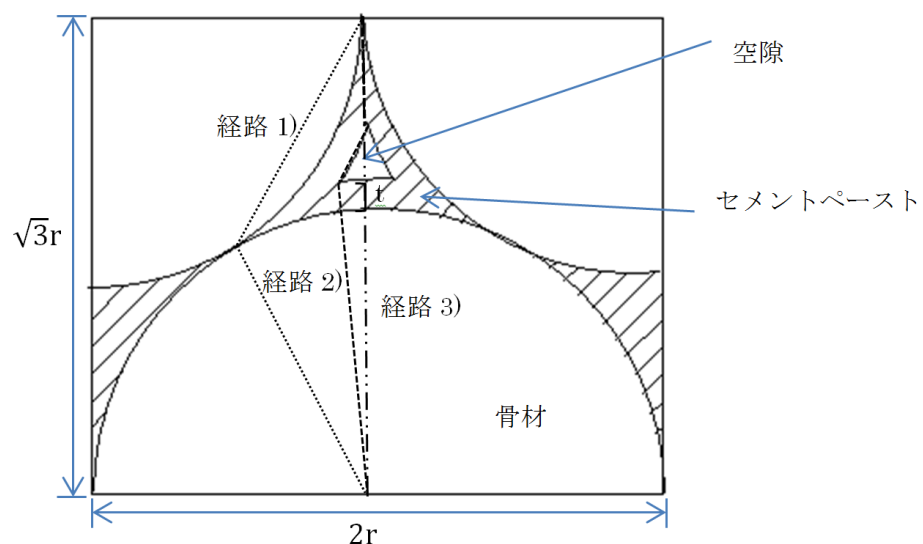


図 6.3 単位斜方格子の解析断

表6.1 各物質における音速

音を伝える物質 (媒質)	音速(m/s)
砕石	5420
セメントペースト (W/C 0.3)	4387
空気	338

$$U_v = 331.5 + 0.5t$$

(6.2)

ここに、 $U_v$  : 空気中の音速(m/s),  $t$  : 空気の摂氏温度(℃)

$$U_1 = L / (L_1 / U_G) \quad (6.3)$$

ここに,  $L_1 = L / \cos 60^\circ$

$$U_2 = L / (L_{2G} / U_G + L_{2C} / U_C) \quad (6.4)$$

ここに,  $L_{2G} = r$

$$L_{2C} = (1 - 2\sqrt{3}/3)(2r + t + \sqrt{2rt + t^2})$$

$$U_3 = L / (L_{3G} / U_G + L_{3C} / U_C + L_{3V} / U_V) \quad (6.5)$$

ここに,  $L_{3G} = r$

$$L_{3C} = \sqrt{2rt + t^2} + t$$

$$L_{3V} = L - L_{3G} - L_{3C}$$

ここに,  $U_1$ : 骨材のみ伝播理論によるモデルの超音波伝播速度(m/s),

$U_2$ : 骨材のみ伝播理論によるモデルの超音波伝播速度(m/s),

$U_3$ : 骨材のみ伝播理論によるモデルの超音波伝播速度(m/s),

$U_G$ : 碎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)

$U_V$ : 空隙の超音波伝播速度(m/s)

$t$ : 結合材膜厚(mm),  $r$ : 理想球体半径(mm)

$L$ : 要素の高さ(mm),  $L_1$ : 経路 1) の長さ(mm)

$L_{2G}$ : 経路 2) の骨材中経路の長さ(mm)

$L_{2C}$ : 経路 2) のセメントペースト中経路の長さ(mm)

$L_{3G}$ : 経路 3) の骨材中経路の長さ(mm)

$L_{3C}$ : 経路 3) のセメントペースト中経路の長さ(mm)

### (3) 各材料の面積比による直列モデルによる検討

前項(2)に示した超音波の伝播経路を仮定した検討以外に，経路を仮定せず構成材料の比から超音波伝播速度を算定する方法に関しても検討を行った。具体的には，図 6.4 に示した解析断面における各材料の面積比を計算し，その比率で各材料を直列に並べた場合の超音波伝播速度を算定した。図 6.5 に，各構成材料の面積比と空隙率の関係の計算結果を示す。各材料の超音波伝播速度は前掲の表 6.1 の値を用いた。式 6.5 には，本モデルによる超音波伝播速度の算定式を示す。

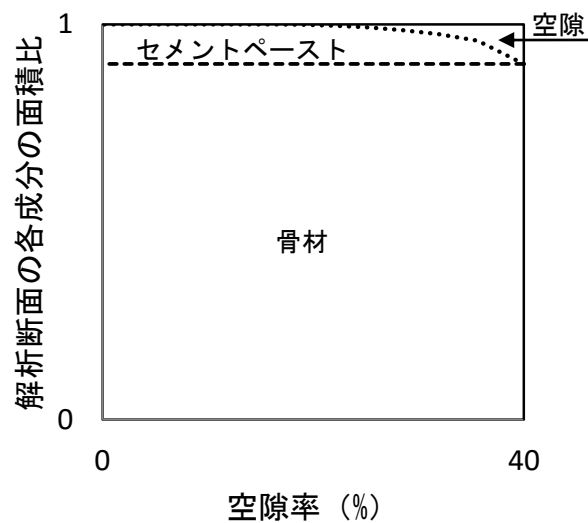


図 6.5 解析断面の各成分の面積比の算定結果

$$U_4 = 1 / (S_G / U_G + S_V / U_V + S_C / U_C) \quad (6.5)$$

ここに， $S_G = \pi / (2\sqrt{3})$

$$S_V = [\sqrt{3}r - (t+r) - \sqrt{2rt + t^2}] / (6r^2)$$

$$S_C = 1 - S_G - S_V$$

ここに， $U_4$ ：骨材セメントペースト伝播理論によるモデルの超音波伝播速度，

$S_G$ ：解析断面における骨材面積率(%)，

$S_V$ ：解析断面における空隙面積率(%)，

$S_C$ ：解析断面におけるセメントペースト面積率(%)，

$U_G$ ：碎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)，

$U_V$ ：空隙の超音波伝播速度(m/s)，

$t$ ：結合材膜厚(mm)， $r$ ：理想球体半径(mm)

### 6.3 解析結果とその考察

#### 6.3.1 超音波の伝播経路を仮定した検討

図 6.6 に経路 1) 骨材のみ伝播による解析結果と第 5 章の実測値との比較を示す。図によれば、経路 1) による超音波伝播速は空隙率と相関がなく、一定値となっている。本解析で空隙率を変化させる際に、粗骨材配列はそのままとし、セメントペースト量（膜厚）のみを変化させて再現しているためであり、当然の結果といえる。一方で、実験結果では空隙率により超音波伝播速度が変化していることから、実際の伝播経路として粗骨材のみとはならないと考えられる。

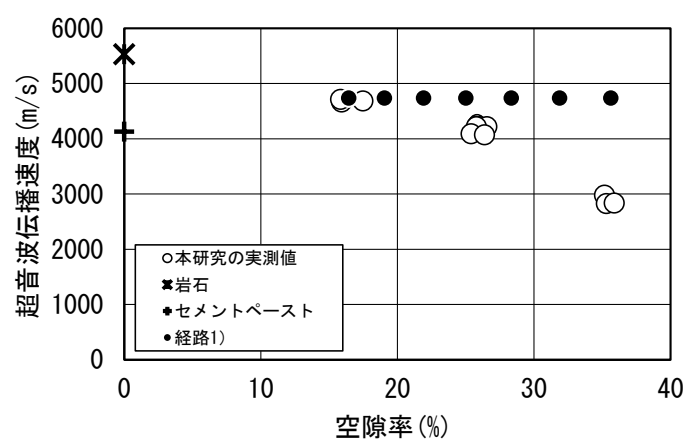


図 6.6 経路 1) による解析結果

図 6.7 に経路 2) による解析結果を示す。経路 2) による超音波伝播速度は、実測値による結果と同様に、空隙率が大きくなるほど小さくなる傾向を定性的に示している。また、経路 2) による空隙率と超音波伝播速度関係は高い相関性を示す二次関数により近似できた。

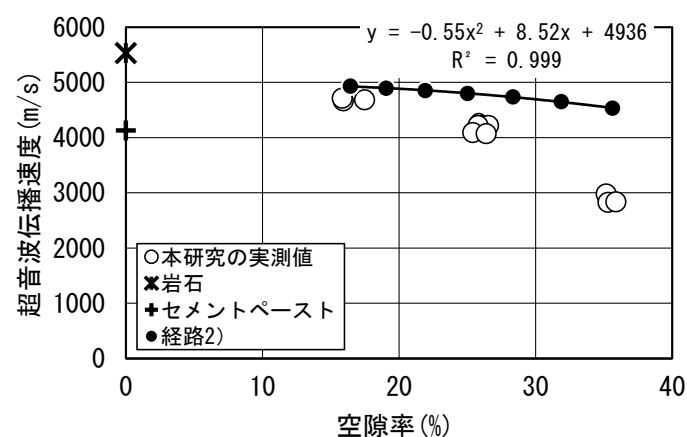


図 6.7 経路 2) による解析結果

図 6.8 に経路 3) による解析結果を示す。経路 3) 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傾向を示している。しかし、超音波伝播速度の変化程度は、空隙率の大きくなるほど小さくなる実測値による結果と逆転している。これは、表 6.1 にも示しており、空気中の音の伝播速度は、碎石とセメントペーストと比較して非常に少ないため、ポーラスコンクリートの伝播速度はほぼ骨材およびセメントペーストの中の伝播経路によると考えられ、当然の結果といえる。

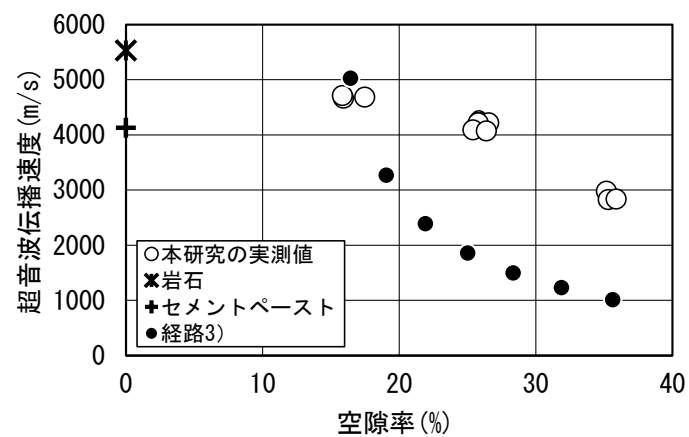


図 6.8 経路 3) による解析結果

### 6.3.2 各材料の面積化による直列モデルによる検討

図 6.9 に、各材料面積による直列モデルによる解析結果を示す。同解析による超音波伝播速度は、空隙率が多くなるほど小さくなる傾向も示しており、同じ空隙率変化での音速の変化も実測値とほぼ同程度となった。また、前節 (1) の経路 2) と同様に、本解析による空隙率と超音波伝播速度の関係は、高い相関性の二次関数によりよく近似できた。

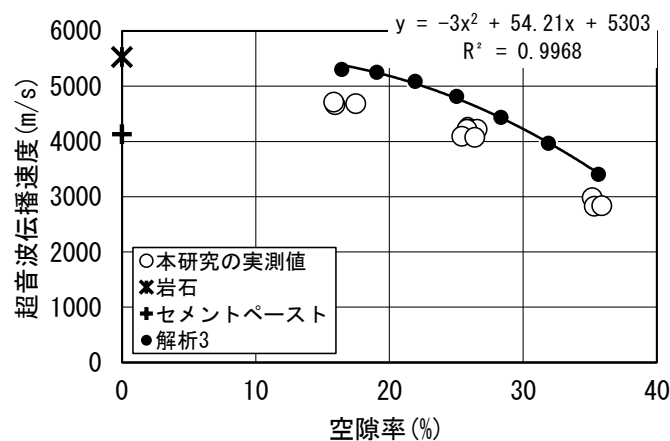


図 6.9 直列モデルによる解析結果

以上の結果を総合して考えると、骨材のみを伝播する場合を除き、ポーラスコンクリートの超音波伝播速度と空隙率の関係は、文献<sup>1)</sup>に述べられているように二次関数により近似される傾向があることが理論的モデルによる解析結果から確認された。

### 6.3.3 既往の研究との比較

図 6.9 に、本研究から得られた実験値と解析結果を文献<sup>1),4)</sup>による実測値との比較を示す。また、同図に文献<sup>1),4)</sup>と本研究の実測値による二次関数による近似式も示す。図によれば、文献<sup>1),3)</sup>および本研究によるポーラスコンクリートの超音波伝播速度と空隙率関係は、異なる実験環境および実験条件であるにもかかわらず、非常に良い相関を示しており、その関係式の相関数も 0.89 程度になっている。したがって、ポーラスコンクリートの超音波伝播速度と空隙率の関係は、二次関数による良く近似が適することが本実験および既往の研究の実測結果からも確認された。

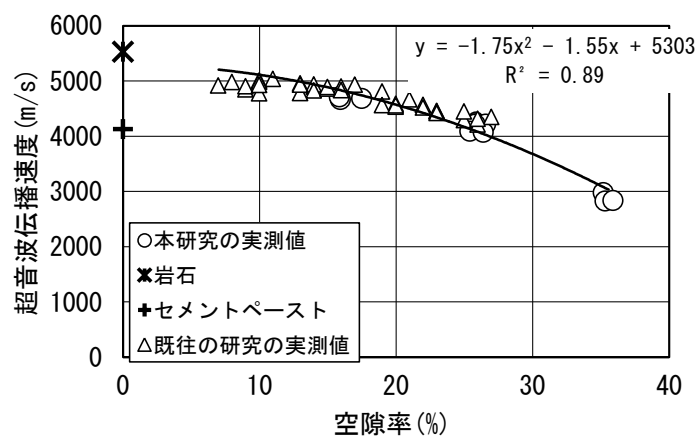


図 6.9 ポーラスコンクリートの空隙率と超音波伝播速度の関係

#### 6.4 まとめ

本章では、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、斜方格子配列を仮定したモデルを用いて簡易な二次元的解析を行い、本研究および既往の研究の実測値との比較を行った。その結果、ポーラスコンクリートの超音波伝播速度と空隙率関係は、二次関数により良く近似できることが明らかとなった。



**【第 6 章の参考文献】**

- 6-1) 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
- 6-2) 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, 建築学科構造系論文集, Vol.73, No.625, pp.363-368, 2008.3
- 6-3) 中村晃, 音速について考えてみよう, 金沢工業大学
- 6-4) 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

## 第7章 ポーラスコンクリートの品質管理手法

### 7.1 はじめに

本章では、文献<sup>7-1)</sup>に示されたポーラスコンクリート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、現場施工されたポーラスコンクリートの空隙率および強度の管理手法に関する検討を行う。

### 7.2 ポーラスコンクリート舗装の施工手順

ポーラスコンクリートの施工は、図 7.1 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、施工されたポーラスコンクリート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、安定したポーラスコンクリートの生産は可能となってきた。

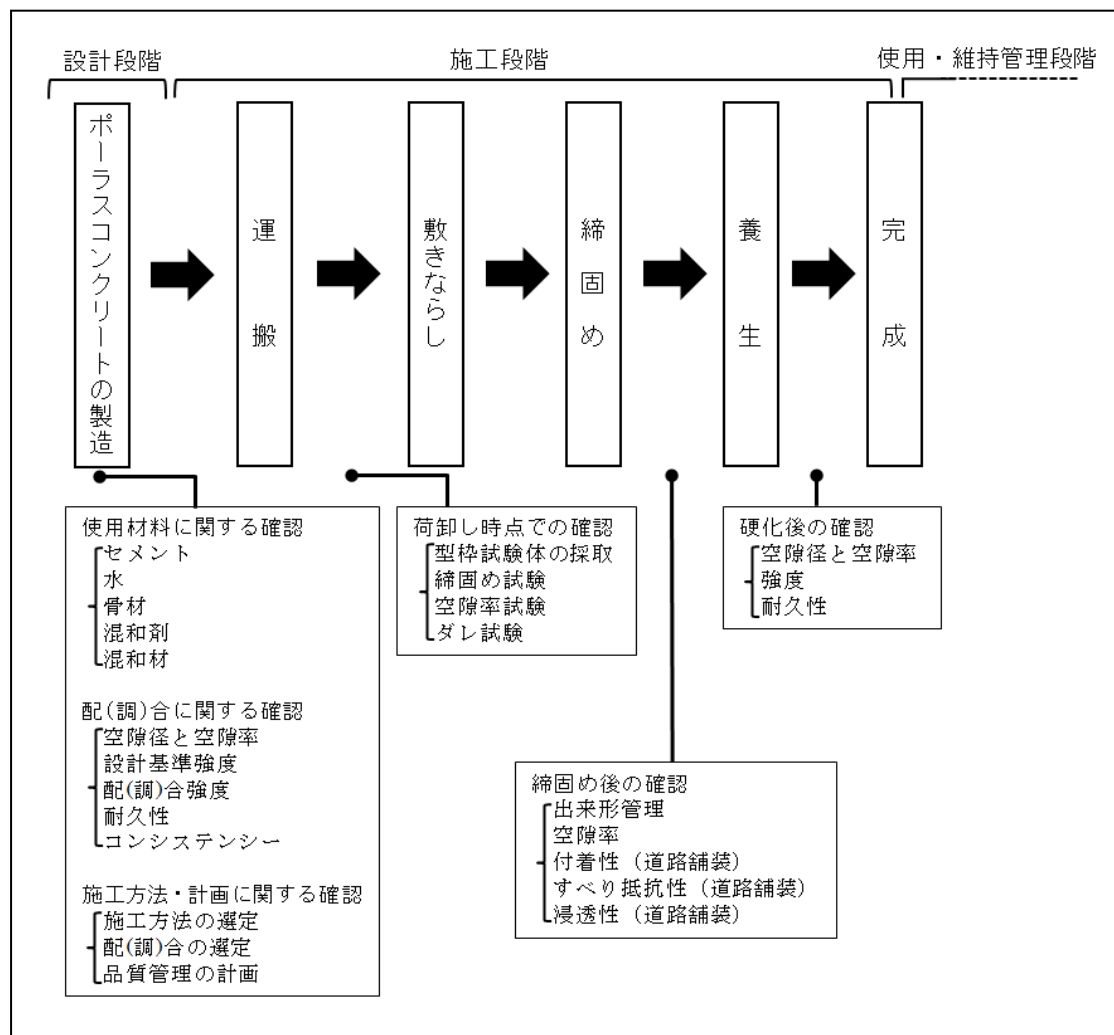


図 7.1 ポーラスコンクリートの施工フローおよび品質管理項目

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ポーラスコンクリート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。

### 7.3 強度管理方法試案と新方法の提案

ポーラスコンクリートの強度管理方法に関する問題点について、文献<sup>7-1)</sup>には表7-1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。

上記の四つ方法は、1) は現場、または製品の構造体ポーラスコンクリート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ポーラスコンクリート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るため、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、非破壊試験によるポーラスコンクリート舗装の空隙率および強度管理方法としていかの方法を提案する。

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ポーラスコンクリート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。

#### 7.4 まとめ

本章では，現場施工されたポーラスコンクリート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，超音波法によるポーラスコンクリート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 7 章の参考文献】**

- 7-1) 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 8 章 総括および今後の課題

### 8.1 総括

本研究の各章で行われた研究内容の相互関係を、図 8.1 を用いて説明する。

第 3 章では、型枠試験体の空隙率と強度との関係式を作成した。同関係式は第 4 章の実大施工実験の結果から現場構造体 POC においても適用できることを明らかにした。また同時に、同じ設計空隙率で施工された現場構造体と型枠試験体においても、締固め程度により実測空隙率が必ずしも同じ値とならないため、型枠試験体を用いて構造体の空隙率および強度を推定することに関する問題点を指摘した。第 5 章では、より簡易的に実用的な品質管理を得ることを目的として、POC の超音波伝播速度と空隙率の間に相関があることを実験的に明らかにした。さらに、第 6 章では超音波伝播速度と空隙率の関係について、簡易モデルによる理論解析により、両者の関係式が二次関数で近似すべきであることを示した。以上の結果を用いて、第 7 章では、現場構造体で測定された超音波伝播速度、超音波伝播速度—空隙率関係式、および空隙率—強度関係式を用いることで、超音波法による構造体 POC の空隙率および強度推定は可能であると考え、強度管理方法試案を提案した。

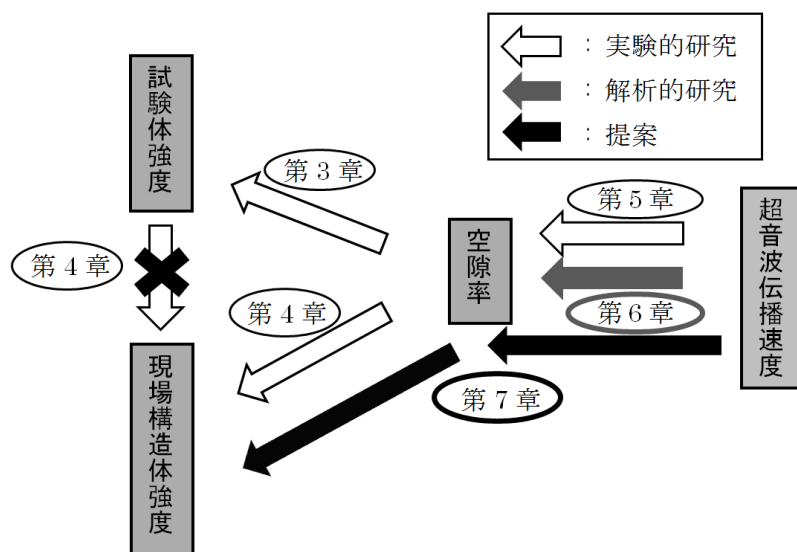


図 8.1 各章内容の関係

各章ごとに得られたまとめを以下に示す。

第 3 章では、空隙率、水セメント比および粗骨材の粒径を変化させたポーラスコンクリート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った。その結果、ポーラスコンクリートの圧縮強度

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ること、また、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表すことができることなどが明らかとなった。

第 4 章では、歩道および建物外構を想定したポーラスコンクリート舗装から切出した供試体（コア供試体）と型枠に打設した供試体（型枠供試体）による強度および空隙率の比較を行い、現場施工されたポーラスコンクリートの現実的な品質管理手法に関して検討を行った。その結果、現場でのフレッシュポーラスコンクリートの空隙率測定により施工後のポーラスコンクリートの空隙率を予測できる可能性があること、仕上げ機の通過回数により現場のポーラスコンクリートの締固めの程度を管理することが可能であること、また、ポーラスコンクリート舗装から採取したコア供試体と型枠供試体について、圧縮強度と空隙率および曲げ強度と空隙率の関係曲線は、ほぼ同じと仮定できることが明らかとなった。

第 5 章では、水セメント比および粗骨材の粒径を変化させたポーラスコンクリートの曲げ試験体を用いて、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ための実験を行った。その結果、ポーラスコンクリートの超音波伝播速度と空隙率の関係は、線形関数により概ね近似することが可能であることが示された。

第 6 章では、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、骨材の実積率と最も近い斜方格子モデルにおいて、骨材のみを伝播する場合、骨材とセメントペーストを伝播する場合、骨材、セメントペーストと空隙率を伝播する場合、および面積率割合に則した場合の二次元的解析を行った。本研究および既往の研究の実測値との比較を行った結果からは、ポーラスコンクリートの超音波伝播速度と空隙率関係は、解析結果からも、実測値による結果からも二次関数により良く近似できることが明らかとなった。

第 7 章では、現在問題視されている現場施工されたポーラスコンクリートの空隙率および強度管理手法に関して、新たに、超音波法によるポーラスコンクリートの空隙率および強度推定手法を提案した。

## 8.2 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) ポーラスコンクリート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。
- 2) ポーラスコンクリート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えると考えられる試験体の弾性係数、超音波の周波数および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。
- 3) ポーラスコンクリート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、本実験では超音波速度法の対面法のうち場合のみの解析的な検討が行われており、今後は表面法に関する検討も必要である。
- 4) ポーラスコンクリートの非破壊試験体方法の維持・管理への応用が期待される。



## 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三島直生先生（三重大学大学院准教授），畑中重光先生（三重大学大学院教授）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）に深く感謝いたします。

特別聴講生を含め 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，日本語を教えていただいた三重大学国際交流センターの先生に感謝いたします。

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に際しては，夏目実穂氏（大学院修了生）のご助力をいただきました。

現場施工されたポーラスコンクリート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。

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，藤木諒将氏（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）をはじめ，三島研究室ならびに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。

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。