

# 論文 超音波によるポーラスコンクリートの内部組成の評価

鎌田敏郎<sup>1)</sup>・国枝稔<sup>2)</sup>・島崎磐<sup>3)</sup>・六郷恵哲<sup>4)</sup>

**要旨：**従来、各種強度あるいは空隙率というパラメータで材料評価されているポーラスコンクリートに対して、材料の局所的な不均質性や欠陥の存在を評価するために超音波法を適用した。その結果、同一の供試体内において、内部組成の不均質性が存在することが超音波伝播速度により評価できた。さらに超音波法を空隙構造の異なるポーラスコンクリートに対して適用した結果、超音波伝播速度は画像解析による空隙面積比と相関が認められ、容積法で測定される空隙率では評価しにくい内部の組成を評価できることが明らかとなった。

**キーワード：**ポーラスコンクリート、超音波法、超音波伝播速度、空隙率、画像解析

## 1. はじめに

ポーラスコンクリートは連続空隙を有し、軽量で、透水性、通気性、断熱性など機能性に富んだコンクリートである。近年、緑化コンクリートとして利用されている例もあり、今後利用の拡大が期待されている。

従来、ポーラスコンクリートの空隙を定量的に評価する指標として、空隙率や透水係数が用いられているが、ポーラスコンクリートの空隙構造は、使用材料や製造方法により変化するため、空隙構造をよりの確に評価するためには空隙率や透水係数だけでは不十分である<sup>1)</sup>。

したがって、ポーラスコンクリートの空隙構造(組成)を的確にしかも非破壊的に評価する手法を開発することが急務となっている。

実験1では、ポーラスコンクリートの同一の供試体内に存在する内部組成の不均質性の把

握に超音波伝播速度を用い、従来から用いられている空隙率や画像解析結果と比較しその適用性について検討した。さらに、実験2では、異なる使用材料、作製方法を用いたポーラスコンクリートへの超音波伝播速度による評価手法の適用性について検討した。

## 2. 実験1

### 2.1 実験概要

#### (1) 供試体の概要

超音波法に用いる比較用の普通コンクリートおよびポーラスコンクリートの示方配合を表-1に示す。粗骨材には粒径5~15mmの玉砕石(表乾比重2.61,粗粒率6.72)を使用した。

圧縮強度用供試体(φ10×20cm)については、4層に分けて型枠に詰め、各層40回ずつ均等に突いた。曲げ強度用供試体(10×10×

表-1 コンクリートの配合

供試体の種類	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
普通コンクリート (Aシリーズ)	50.4	173	343	789	1031	1.03
ポーラスコンクリート (B, Cシリーズ)	30	90	300	—	1607	—

混和剤: AE減水剤

- \*1 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)
- \*2 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 工修 (正会員)
- \*3 岐阜工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (正会員)
- \*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

表-2 供試体作製方法

シリーズ名	供試体の作製方法	曲げ供試体本数
Aシリーズ (普通コンクリート)	テーブル vibrator (5 秒間) + 押さえ	10
Bシリーズ (ポーラスコンクリート)	手による突き固めのみ	12
Cシリーズ (ポーラスコンクリート)	テーブル vibrator (5 秒間) + 押さえ	12

表-3 強度試験結果および空隙率

グループ名	シリーズ名	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	曲げ強度 N/mm <sup>2</sup>	連続空隙率 (%)	全空隙率 (%)	空隙面積比 (%)
グループ 1	Bシリーズ	15.6	1.61	24.3	24.9	30.8
	Cシリーズ	16.8	1.89	21.9	22.6	28.7

40cm) についても、2層に分けて詰め、各層 100 回ずつ均等に突いた。供試体のシリーズは作製方法の違いにより表-2 に示す 3 種類とした。A, Cシリーズは打設面表層部の骨材の浮きを抑止することを目的とし、打設面を木の板を用いて押さえた。実験 2 との比較のため、ここで作製したポーラスコンクリート (B, Cシリーズ) は、グループ 1 に分類した。

すべての供試体は打設後 3 日で脱型し、載荷試験直前まで水中養生を行った。曲げ強度試験については、載荷スパン 30cm の 3 点曲げ載荷とし、載荷試験はすべて材齢 28 日で行った。

(2) 超音波伝播速度の測定と画像解析方法

超音波伝播速度の測定は曲げ強度試験用供試体を対象とし、図-1 に示すように供試体中央 (載荷位置) と端部から 10cm の位置の断面 (10×10cm) を高さ方向に 3 等分した領域について行った。この測定は、同一箇所において 3 回実施し、計測位置①, ②, ③の平均値を求めて評価に用いることとした。また、測定には UST (探触子: φ37.5mm) を用いた。この探触子の直径は、それぞれの領域内の平均的な伝播速度を把握するのに適当な大きさであり、しかも側面に存在する空隙に比べて十分大きいと考えられる。なお、探触子の供試体表面への接触にあたっては、ソニコート E を接触媒質として用いた。

画像解析は、曲げ強度試験用供試体をカッターを用いて切断し、石膏を空隙部分 (連続空

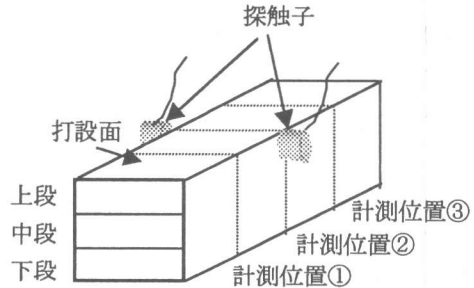


図-1 超音波伝播速度の測定方法

隙および独立空隙) に充填した。次にこの供試体の写真を撮り、スキャナー (解像度 100dpi) を用いて読みとった。空隙面積比 (対象とする範囲に占める空隙面積の割合) の算定にはモード法により 2 値化した画像を用いた。

(3) 空隙率の測定

空隙率の測定は、「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法 (案)」の容積法<sup>2)</sup>に準じて行った。ただし、実験 1 においては、曲げ供試体を対象として全空隙および連続空隙を測定した。

2.3 実験結果

(1) 強度試験結果および空隙率

今回作製したポーラスコンクリートの圧縮強度、曲げ強度を表-3 に示す。同時に、連続空隙率および全空隙率の各シリーズの平均値も示す。作製したポーラスコンクリートの圧縮強度および曲げ強度は、BシリーズよりCシリーズの方が大きい結果となった。

空隙率については、Cシリーズの方がBシリーズより全空隙および連続空隙ともに小さく、

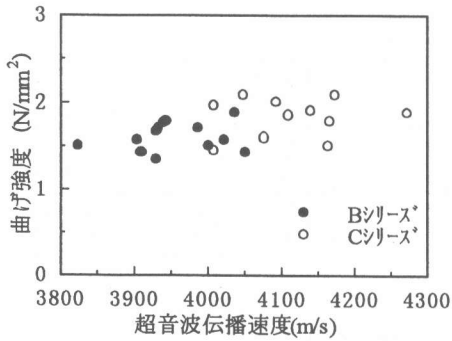


図-2 曲げ強度と超音波伝播速度

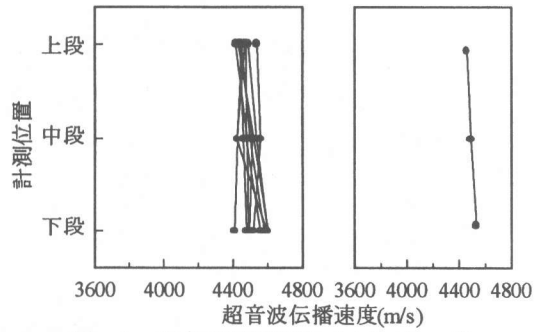


図-3 超音波伝播速度 (Aシリーズ)

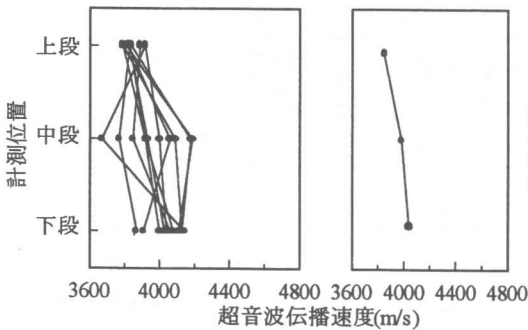


図-4 超音波伝播速度 (Bシリーズ)

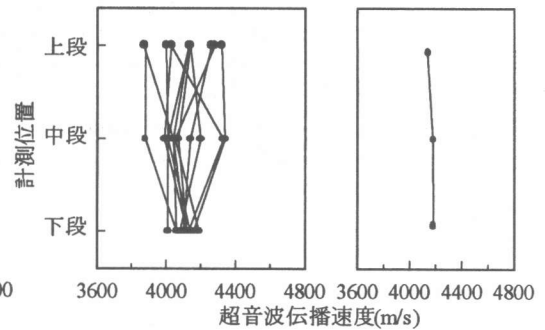


図-5 超音波伝播速度 (Cシリーズ)

圧縮および曲げ強度との相関が認められた。

図-2 に、各供試体における超音波伝播速度の平均値と曲げ強度との関係を示す。これによれば、Bシリーズに比べて、Cシリーズの方が超音波伝播速度が大きくなっており、パイプレーターによる締固めによって、ポーラスコンクリートの空隙構造が変化していることが評価できている。また、このことは曲げ強度の平均値においてBシリーズよりもCシリーズが大きくなっていることと対応しているものと考えられる。

## (2) 空隙面積比と超音波法の対応

つぎに、容積法で測定した全空隙率と画像解析によって得られた空隙面積比のうち各シリーズの平均値を表-3 に示す。なお、ここでは各シリーズそれぞれ5本の供試体のみを対象とした。これより、容積法および画像解析によって得られた空隙面積比の値は、必ずしも一致していないが、各シリーズの空隙率の大小関係は再現できていることが分かる。また、既往の研

究結果<sup>1)</sup>においても、容積法による空隙率と画像解析による空隙面積比の値は一致していないことが示されている。

## (3) 同一供試体内の組成

各シリーズにおける供試体の超音波伝播速度とその平均値(上段、中段、下段の各位置において計測された超音波伝播速度を平均した値)を図-3~5 に示す。なお、実線で結んだ値が、同一供試体において計測されたことを意味している。Aシリーズについては、計測位置の違いはほとんど見られず、同一箇所におけるばらつきも小さい。Bシリーズについては下段に比べて上段の伝播速度が小さく、同一供試体内の組成に差が生じていることが明らかとなった。Cシリーズにおける組成の差は、Bシリーズに比べるとそれほど明確ではないが、ばらつきという観点においては大きい結果となった。

なお、Aシリーズに比べてBおよびCシリーズの超音波伝播速度が小さいことから多孔質なポーラスコンクリートの特徴を反映していると

表-4 コンクリートの配合

グループ名	供試体の種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
グループ 2	Dシリーズ	30.0	—	90	300	—	1773
	Eシリーズ	30.0	—	90	300	—	1506
グループ 3	Fシリーズ	30.0	6.6	90	300	104	1506
	Gシリーズ	30.0	12.4	90	300	208	1506

細骨材：粒径 0.15～1.2mm

粗骨材：粒径 10～15mm

表-5 強度試験結果および空隙率

グループ名	シリーズ名	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	曲げ強度 N/mm <sup>2</sup>	連続空隙率 (%)	全空隙率 (%)	空隙面積比 (%)
グループ 2	Dシリーズ	7.57	2.21	32.6	33.5	27.0
	Eシリーズ	8.98	2.17	31.5	32.6	25.2
グループ 3	Fシリーズ	15.1	2.77	26.6	27.5	21.3
	Gシリーズ	20.4	3.25	24.0	24.7	20.9

いえる。

#### 2.4 実験1のまとめ

ポーラスコンクリートの同一供試体内における不均質性の評価を目的とし、超音波法を適用した結果以下の結論が得られた。

- (1) ポーラスコンクリートの組成の評価に超音波伝播速度が有効であることが分かった。
- (2) 締固めをしないポーラスコンクリートにおいては打ち込み高さの影響が特に大きく、打設面に近づくほど超音波伝播速度は小さくなる傾向がある。一方、バイブレーター等を用いて締固めをする際には、強度の改善が可能であるが、そのばらつきは大きくなる可能性がある。

### 3. 実験2

#### 3.1 供試体の概要

実験2で使用したポーラスコンクリートの示方配合を表-4に示す。実験2で使用したすべての粗骨材は、実験1の粗骨材（粒径5～15mm）のうち粒径10～15mmものを使用した。

F, Gシリーズについては細骨材（粒径0.15～1.2mm）を使用し、D, Eシリーズとは異なる。よって実験1と粗骨材の粒径が異なっているD, Eシリーズをグループ2に分類し、細骨

材を用いたE, Fシリーズをグループ3に分類した。

圧縮強度用供試体は、一度に試料を詰めた後、直径9.5cm、厚さ3.0cmの鋼板をコンクリート上に置き、その上から平板バイブレーターで10秒間締固めを行った。曲げ強度用供試体は、一度に試料を詰めた後、型枠の底板に対して棒状バイブレータをあて、15秒間締め固めた。すべての供試体は打設後1日で脱型し、載荷試験直前まで水中養生を行った。載荷試験方法、材齢、超音波伝播速度の計測方法および画像解析方法はすべて実験1に準じて行った。ただし、空隙率の測定については実験1とは異なり、圧縮強度用供試体（φ10×20cm）を用いた。

#### 3.2 実験結果

##### (1) 強度試験結果および空隙率

実験2で作製したポーラスコンクリートの圧縮強度、曲げ強度を表-5に示す。

グループ2においては、空隙率の小さいEシリーズの方が圧縮強度が大きい、曲げ強度は小さくなった。

グループ3においては、空隙率の小さいGシリーズの方が曲げ強度および圧縮強度が大きくなり、空隙率と強度との相関が認められた。

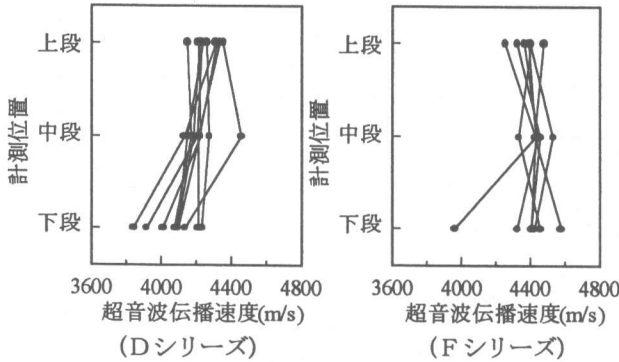


図-6 計測結果

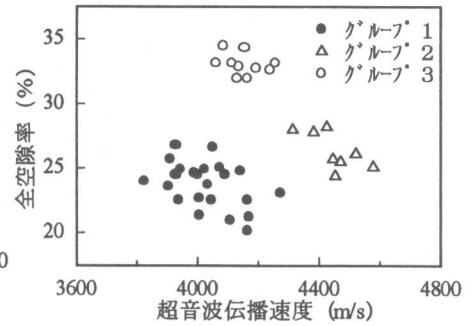


図-7 全空隙率と超音波伝播速度

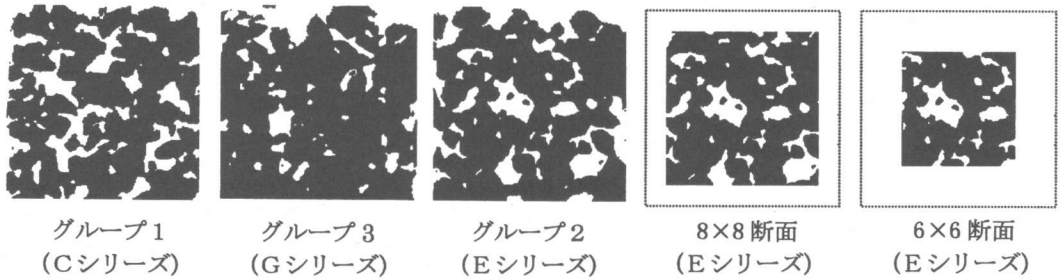


図-8 2値化した画像の例と解析対象範囲

## (2) 超音波伝播速度

図-1 の計測位置①、③において上段、中段、下段ごとに計測した超音波伝播速度のうち、D、Fシリーズの計測結果を図-6 に示す。これらより、グループ1の計測結果に比べて超音波伝播速度が大きく、計測位置におけるばらつきも比較的小さいことが分かる。また、Dシリーズにおいては、上段の超音波伝播速度が下段よりも大きくなる傾向が認められた。これは締固め方法の違いによって生じた可能性が考えられるが、締固め方法の違いによる空隙構造の変化については、今後さらに検討する必要があると思われる。

## 3.3 グループ間の比較

### (1) 超音波伝播速度

各グループの計測結果(図-7)を比較すると、グループ1に比べてグループ2、3の方が容積法による全空隙率が大きいにもかかわらず、超音波伝播速度も大きい値を示しており、本実

験においてはグループ1およびグループ2、3の2種類の全空隙率-超音波伝播速度関係が得られた。このことは、空隙率が大きくなるにつれて超音波伝播速度が小さくなるというグループ内に見られた相関と矛盾している結果である。この理由を明らかにするために、次節において実際の断面構造を検討した。

### (2) ポーラスコンクリートの空隙構造

断面写真をもとに2値化したC、E、Gシリーズの画像の例を図-8 に示す。これらによると、グループ1(Cシリーズ)の方が、グループ2(Eシリーズ)およびグループ3(Gシリーズ)に比べて断面内の空隙の数が多く、しかも骨材間の結合部分が細くなっており、空隙構造(組成)がグループ1とグループ2、3において異なっていることが確認できる。

C、E、Gシリーズの3種類の供試体(供試体数:Cシリーズ5本、E、Gシリーズ4本)を対象として、図-8 に示すような断面中心を

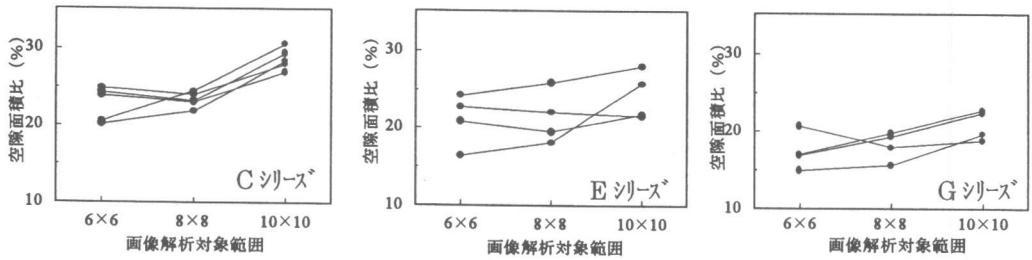


図-9 空隙面積比

一致させて 10×10cm, 8×8cm, 6×6cm の範囲内で、空隙面積比を算出した結果を図-9 に示す。Eシリーズの値のばらつきが大きいですが、すべてのシリーズにおいて 10×10cm の空隙面積比が他に比べて大きいことが分かる。6×6cm になるとその値はほぼ収束しており、その平均値はCシリーズ 22.7%, Eシリーズが 21.0%, Gシリーズが 17.4%となった。この結果は、同じ供試体の超音波伝播速度の平均値（上段、中段、下段）がC, Eシリーズにおいてそれぞれ 4110m/s, 4160m/s となり、Gシリーズが 4510m/s であることと相関が認められた。6×6cm の範囲内で算定された空隙面積比と超音波伝播速度との関係を図-10 に示す。この図より、超音波伝播速度が空隙構造の異なる3種類の空隙面積比（6×6cm）と相関があることが分かる。この理由として、超音波はポーラスコンクリートの空隙以外の部分（図-8 中の黒色の部分）を通過し、このうち最短の伝播経路の長さにより伝播速度が決定される。この最短経路の長さは、供試体表面部の空隙の影響を殆ど受けず、ここで算出される空隙面積比に支配されるものであるためと考えられる。以上より、超音波伝播速度がポーラスコンクリートの内部の組成の違いを評価しうる指標であることが確認できた。

画像解析による空隙面積比が、対象サイズによって異なる理由については、供試体表面部の空隙の形状や配置が供試体内部とは異なっていることや、表面部における見かけの空隙の量が供試体全体の空隙の量に対して相対的に大きいことが考えられる。また、ポーラスコンクリ

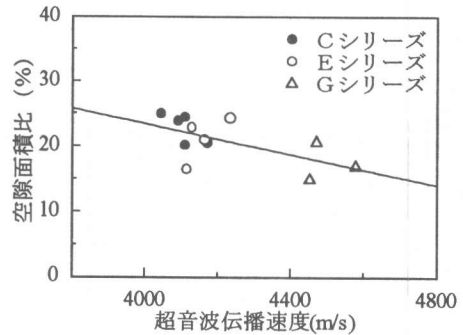


図-10 空隙面積比と超音波伝播速度

ートの供試体において、表面部と内部における空隙構造（組成）が異なっていることが明らかとなった。

### 3.4 実験2のまとめ

ポーラスコンクリートの性能評価においては、供試体内部の空隙構造をより的確に把握することが重要と考えられる。この観点から見て超音波伝播速度は、特にポーラスコンクリート内部の空隙組成を非破壊的に評価する手法として有効である。

したがって、今後、図-10 に示す関係において、超音波伝播速度の適用範囲およびばらつき等を明らかにすることによって、評価法としての実用化を目指していくつもりである。

### 参考文献

- 1) 上野雅之, 碓井浩, 岡本享久, 吉森和人: ポーラスコンクリートの空隙構造の定量化と物理特性に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集 No. 50, pp. 376-381, 1996.
- 2) 日本コンクリート工学協会: エココンクリート研究委員会報告書, 1995. 11.