

論文 衝撃弾性波法を用いたポーラスコンクリートの空隙率推定に関する基礎的研究

野内 彩可*1・渡辺 健*2・圓藤 将司*3・橋本 親典*4

要旨: 本研究では、衝撃弾性波法を用いたポーラスコンクリートの空隙率推定手法の確立に向け、ポーラスコンクリートの空隙性状に加えて、加速度センサの固定方法や試験体の表面性状および含水量などの測定因子が打撃応答特性に及ぼす影響について多重反射法により検討を行った。その結果、多重反射法を用いた場合には、測定面と加速度センサとの密着が十分に確保されていれば、打撃応答特性は測定因子の影響を受けにくいことが明らかとなった。さらに、同一材料からなるポーラスコンクリートの空隙率と弾性波速度は高い相関性を有しており、ポーラスコンクリートの空隙率推定に弾性波速度が有用なことが示された。

キーワード: ポーラスコンクリート, 空隙率, 衝撃弾性波法, 打撃応答特性

1. はじめに

ポーラスコンクリートは透水性や、保水性、揚水性など様々な優れた機能を持ち、近年の都市型水害の増加に伴う都市防災や環境保全の観点から今後国内外問わず、さらに需要が増加すると考えられる社会基盤材料の一つである。ポーラスコンクリートの品質評価は、主に空隙特性に依存する空隙率や透水係数、強度が用いられるが、ポーラスコンクリートは普通コンクリートとは異なり、施工時の締固めの程度や壁効果により空隙特性が変化する¹⁾。そのため、実施工物と型枠試験体では、同様の締固め状態を再現することは困難な場合があり、実施工物の品質評価はコア採取によって得られたコア試験体を用いて行うことが妥当であるとされている。しかしながら、コア試験体を用いることは、実施工物の一部を傷つける行為であるため、非破壊試験手法を用いたポーラスコンクリートの空隙率推定手法の確立は有用であるといえる。

既往の研究において、コンクリート構造物内部に生じた豆板の探査手法の確立を目的に、豆板を模擬したポーラスコンクリートを使用して、衝撃弾性波法や超音波法により検討を行った研究は存在するが、ポーラスコンクリート自体の空隙率推定について検討を行った試みは極めて少ない^{2)~4)}。また、一般的に、コンクリート中を伝搬する弾性波伝搬速度は、含水量の影響を受け、コンクリート中の空隙のうち、水でみだされたものの割合が大きくなるにしたがって、弾性波伝搬速度は速くなると言われている。一方で、水分を多く含むポーラスコンクリートの打撃応答特性と含水量の関係性については、十分な議論がなされていない。

そこで本研究では、より簡便かつ定量的なポーラスコ

ンクリートの空隙率推定手法の確立に向けた基礎的研究として、衝撃弾性波法の多重反射法を用いてポーラスコンクリートにおける加速度センサの固定方法や測定面と加速度センサの接触面積の影響、試験体のキャッピングの有無が打撃応答特性に及ぼす影響について検討を行った。加えて、ポーラスコンクリートの空隙率や粒形といった空隙性状が打撃応答特性に及ぼす影響やポーラスコンクリートの含水量が打撃応答特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

(1) 人工空隙試験体

空隙形状が均一である場合の空隙率と打撃応答特性の関係について検討するため、人工空隙試験体を作製した。表-1に人工空隙試験体の計画配合を示す。試験体は $\phi 100 \times 200$ mmの円柱試験体である。試験体内部には、内部空隙を模擬した発泡スチロールビーズ ($\phi 4.0 \sim 4.5$ mm, 密度約 0.02 g/cm^3) を設計空隙率に合わせて所定量混入した。設計空隙率は5~25%までの5%間隔とし、発泡スチロールビーズをコンクリートと容積置換した。なお、試験体は各パラメータ2体作製し、発泡スチロールビーズを混入していない健全試験体も併せて作製した。

セメントは、早強ポルトランドセメントを使用し、設計空隙率に合わせ、コンクリートと発泡スチロールビーズを各質量計量して練り混ぜた。試験体の作製は、複数層に分けてコンクリートを打設し、各層突き棒で15~30回程度突いた後、発泡スチロールビーズが浮いてこない程度に木づちで叩いて締固めた。打設面は、衝撃弾性波

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部 知的力学システム工学専攻 博士前期課程 (学生会員)

*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 准教授 博 (工) (正会員)

*3 徳島大学 工学部 建設工学科

*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 教授 工博 (正会員)

試験に耐えられる強度を確保するため、打設翌日に、セメントペーストを用いてキャッピングを行なった。試験体は、材齢7日まで水中養生を行ない、その後は気中養生とした。なお、コンクリートの圧縮強度は、材齢7日時点で30.0 N/mm²であった。

(2) ポーラスコンクリート試験体

表-2 にポーラスコンクリート試験体（以下、POC 試験体と称す。）の計画配合を示す。試験体はφ100 mm×150 mm の円柱試験体であり、単粒度砕石6号（5.0～13 mm）および7号（2.5～5.0 mm）を用いた2種類を作製した。POC 試験体の設計空隙率は、6号砕石を使用した試験体は19, 23, 27%, 7号砕石を使用した試験体は16, 20, 24%であり、各パラメータ5体作製した。

POC 試験体の作製は、ポーラスコンクリートを練り混ぜた後、所定の空隙率に合わせて予め求めた質量を型枠に詰め込み、下部よりテーブルバイブレーター、上部よりφ100 mm×50 mm のおもりとハンドバイブレーターを使用して振動締め固めを行った。

2.2 空隙率の測定

表-3 に試験体のパラメータおよび測定した各試験体の空隙率を示す。

人工空隙試験体は、脱型後の質量および試験体寸法を用いて式(1)より全空隙率を算出した。

$$A_t = \frac{T - W}{T} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 A_t : 全空隙率 (%), T : 空気が全くないものとして計算したコンクリートの単位容積質量 (kg/m³) ($T=2300$ kg/m³ と仮定), W : 脱型後の試験体の単位容積質量 (kg/m³) である。

POC 試験体は、ポーラスコンクリートの空隙率試験方法（案）の質量法に準拠して全空隙率を算出した⁵⁾。

2.3 衝撃弾性波法による測定

衝撃弾性波法による測定は多重反射法を用いて行った。図-1 に多重反射法による測定状況を示す。打撃の入力にはφ10 mm（入力周波数：29.1 kHz 程度）の鋼球ハンマを用い、打撃により生じた応答信号の取得には、加速度センサを用いた。打撃点は試験体の中心部とし、加速度センサは打撃点から 25 mm 離れた同一表面に固定した。

測定におけるサンプリング数は 4096、データ長は 0.0819 s、サンプリング時間は 20 μs とし、5回の打撃による時刻歴応答をパソコンに記録した。また、記録した時刻歴応答をFFT変換し、周波数スペクトルを取得した。なお、時間領域の検討には5回の打撃による時間軸加算平均値を用い、周波数領域の検討には5回の打撃によるスペクトル加算平均値（実効値）を用いた。

表-1 人工空隙試験体の計画配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE剤	高性能AE減水剤
25	55	48	4.5	174	317	839	909	0.95	3.17

表-2 POC 試験体の計画配合

シリーズ名	粗骨材種類	設計空隙率 (%)	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³) ※				
				水	セメント	混和材	BFSS	砕石
POC6	6号砕石	19, 23, 27	23.1	53	210	19	229	1439
POC7	7号砕石	16, 20, 24	24.7	92	373	—	94	1391

BFSS: 5 mm 高炉スラグ細骨材

※ POC6号は空隙率27%, POC7号は空隙率24%の配合を一例として示す。

表-3 試験体のパラメータおよび測定空隙率

試験体シリーズ	設計空隙率 (%)	全空隙率 (%)				
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
健全	0	3.1				1.5
	5	6.3				5.5
	10	10.8				10.4
	15	15.7				16.3
	20	20.9				21.0
	25	24.9				25.9
POC6	19	18.8	19.5	19.4	19.5	19.5
	23	23.1	23.0	23.0	23.4	23.1
	27	26.7	26.9	26.9	26.9	26.9
POC7	16	16.1	16.1	16.6	16.0	16.3
	20	20.2	20.2	20.2	19.9	20.0
	24	24.0	23.4	24.0	24.2	23.9

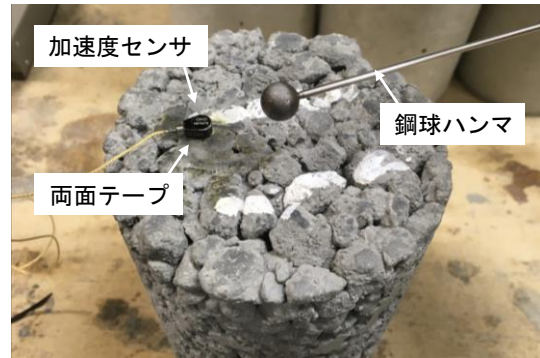


図-1 多重反射法による測定状況

3. 測定条件が打撃応答特性に及ぼす影響

3.1 加速度センサの固定方法および加速度センサの接触面積の影響

ポーラスコンクリートの試験体表面は、普通コンクリートとは異なり、結合材によってコーティングされた骨材が露出し、不陸になっている。このことから、衝撃弾性波法を用いて測定を行う場合には、打撃により生じた応答信号を取得する加速度センサの固定方法や使用する加速度センサの選択に留意する必要がある。そこで本研究では、POC 試験体を対象に、表-4 に示す検討条件のもと、ポーラスコンクリートにおける加速度センサの固定方法および推奨される加速度センサの種類について検

討した。

図-2に一例として、各加速度センサにより取得した、固定方法の違いによる6号砕石を使用した空隙率27%、No.1、POC試験体(以降、POC6-27%-1試験体と称す。)のスペクトル比を示す。ここでスペクトル比は、打撃のバラツキを考慮し、周波数スペクトルの最大のピーク周波数である卓越周波数の振幅値で正規化した値である。なお、加速度センサBの測定周波数範囲は12kHzまでであるが、比較のための参考値として20kHzまでの測定値を示している。

図-2(a)より、試験体表面との接触面積が小さい加速度センサAを用いた場合には、加速度センサの固定方法によらずスペクトル比はほぼ一致している。また、指で押さえて固定した場合のみ、15kHz以降のスペクトル比が異なっているが、これは両面テープやグリースを用いた場合には、接触媒質の影響による弾性波の減衰が生じ、指で押さえた場合と比較して15kHz以降の感度がわずかに低下したためと考えられる。

図-2(b)より、試験体表面との接触面積が比較的大きい加速度センサBを用いた場合には、スペクトル比のピークは一致しているが、5kHz以下にノイズと考えられるピークが出現している。また、指で固定した場合と比較して、両面テープやグリースを用いて固定した場合には、波形全体が粗く見える。これは、試験体表面と加速度センサの密着度が悪く、測定感度が低下したことにより、受信した振動信号のエネルギーが低下し、相対的に細かいノイズが目立っているためである。そのため、不陸な測定面に対し、接触面積の大きな加速度センサを用いた場合には、試験体表面の不陸の影響を受けやすく、試験体表面と加速度センサとの密着度の低下によるノイズを含有しやすくなると考えられる。

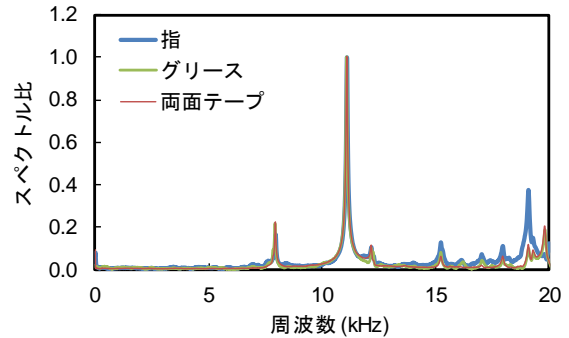
以上より、測定面と加速度センサとの密着が十分に確保されていれば、測定面が不陸な場合にも加速度センサの固定方法によらず、打撃応答を測定可能であることが確認された。また、使用する加速度センサの接触面積が大きいほど、相対的に測定面の不陸の影響を受けやすくなることから、試験体の表面性状に合わせ適切な加速度センサを選択することが必要であると考えられる。よって以降の検討では、指で押さえることによって生じるバラツキの不確実性や、グリースを用いた場合にはグリースのふき取りが困難であることを鑑み、試験体表面との接触面積の小さい加速度センサAを薄手の両面テープにより試験体表面に接着することで試験を実施した。

3.2 表面性状による影響

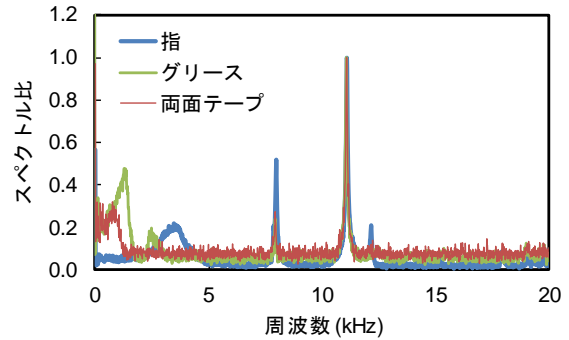
前述したようにポーラスコンクリートは、表面が粗骨材の露出により不陸になっていることから、衝撃弾性波法を用いて試験を行う場合には、表面の不陸の影響を考

表-4 検討条件

実験条件	実験水準
加速度センサ	【A】 接触面積：φ3.5mm，測定周波数範囲：4Hz～20kHz，最大使用加速度：4900m/s ²
	【B】 接触面積：φ12.0mm，測定周波数範囲：5Hz～12kHz，最大使用加速度：2200m/s ²
固定方法	指，グリース，薄手の両面テープ（厚さ0.23mm）



(a) 加速度センサA（接触面積：φ3.5mm）



(b) 加速度センサB（接触面積：φ12.0mm）

図-2 加速度センサの固定方法および加速度センサによるスペクトル比の比較（POC6-27%-1試験体）

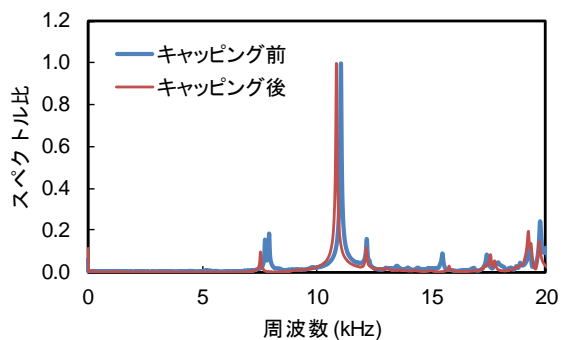


図-3 キャッピング前後のスペクトル比の比較（POC6-27%-5試験体）

慮し、キャッピングや表面研磨などの対応が考えられる。そこで、POC試験体を対象にキャッピング前後の打撃応答特性の違いについて多重反射法により検討した。

図-3に一例としてPOC6-27%-5試験体のキャッピング前後のスペクトル比を示す。図より、キャッピング前後において周波数スペクトルの形状は概ね一致してい

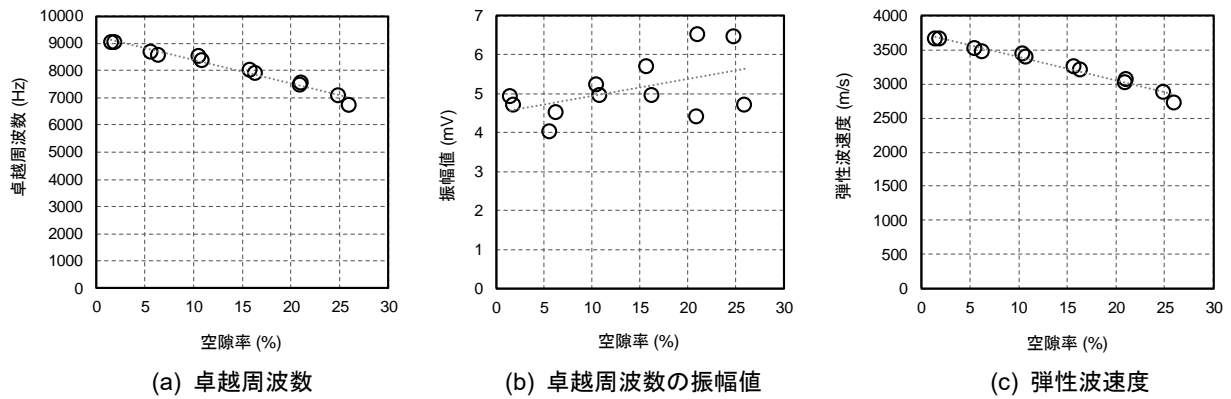


図-4 人工空隙試験体の空隙率と各打撃応答特性の関係

る。また、キャッピング後の方が周波数スペクトルの卓越周波数はわずかに低周波側へ移行しているが、これはキャッピングを行ったことにより、試験体長さが変化したことも影響していると考えられる。そのため、試験体長さの影響を排除するために、式(2)より弾性波伝搬速度（以下、弾性波速度と称す。）を算出した。

$$V_p = 2 \cdot f_0 \cdot L \quad (2)$$

ここで、 V_p は弾性波速度 (m/s)、 f_0 は卓越周波数 (Hz)、 L は試験体高さ (m)である。弾性波速度は、キャッピング前は 3348 m/s、キャッピング後は 3293 m/s であり、キャッピング前と比較してキャッピング後の弾性波速度は低下した。これは、セメントペースト部分の弾性波速度が骨材よりも遅いことが要因であると考えられ、キャッピングを行った場合には、セメントペースト部分の影響を受けることが確認された。

以上より、衝撃弾性波法の多重反射法を用いて検討を行う場合には、ポーラスコンクリートの表面性状の影響は小さく、キャッピングを行った場合には、キャッピング材料の影響を受けることが明らかとなった。そのため、以降の検討では、POC 試験体はキャッピングを行わずに試験を実施した。

4. ポーラスコンクリートの諸特性が打撃応答特性に及ぼす影響

4.1 人工空隙試験体による検討

本章では、前章までの検討結果を踏まえ、まずは人工空隙試験体を用いて、空隙形状が均一である場合の空隙率と打撃応答特性の関係について衝撃弾性波法の多重反射法により検討した。

図-4 に空隙率と各打撃応答特性の関係を示す。図-4(a)より、空隙率の増加に伴い、周波数スペクトルの卓越周波数は低周波側へ移行し、直線的な傾向を示すことが確認できる。また、図-4(b)より、空隙率と卓越周波数の振幅値の関係は、打撃の影響を考慮していないため、

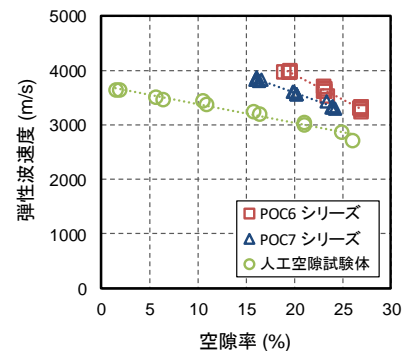


図-5 試験体種別の空隙率と弾性波速度の関係

値のバラツキが大きいものの、空隙率の増加に伴い、卓越周波数の振幅値は大きくなる傾向が認められた。

図-4(c)に式(2)より算出した多重反射法による弾性波速度を示す。卓越周波数と同様、空隙率の増加に伴い、弾性波速度は直線的に低下している。なお、弾性波速度の値は健全試験体と空隙率 25%の人工空隙試験体とでは、最大で 935 m/s 異なった。これらの要因としては、空隙率の増加に伴い、発泡スチロールビーズの混入量が増加することで、試験体全体の静弾性係数が低下したことが要因であると考えられる。

4.2 POC 試験体による検討

続いて、POC 試験体を用いて粒形の異なる POC6 シリーズと POC7 シリーズを対象に、空隙性状が打撃応答特性に及ぼす影響について検討した。

図-5 に試験体種別の空隙率と弾性波速度の関係を示す。なお、図には人工空隙試験体の結果も併せて示している。POC 試験体は人工空隙試験体と同様に、空隙率の増加に伴い、弾性波速度が直線的に低下する傾向が確認できる。また、ポーラスコンクリートの空隙径は、粗骨材の粒径によって変化し、粒径が大きいほど、空隙径も大きくなる。一般的にポーラスコンクリートは、空隙率が同一の場合、粒径が小さいほど空隙径が小さくなり圧縮強度は増加する。齋藤らは、ポーラスコンクリートの圧縮性状に及ぼす全空隙率や水セメント比、圧縮強度、

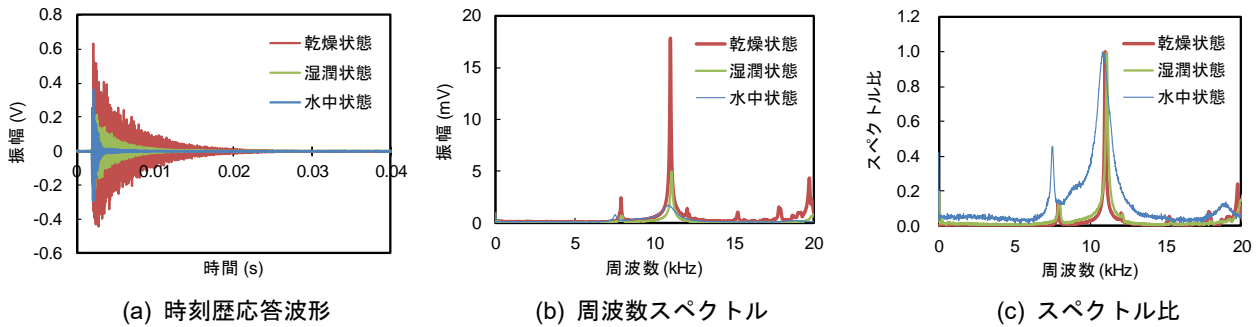


図-6 ポーラスコンクリートの含水量が各打撃応答特性に及ぼす影響 (POC6 - 27% - 1 試験体)

静弾性係数、動弾性係数の関係を明らかにすることを目的に検討を行っており、ポーラスコンクリートの圧縮強度と静弾性係数および動弾性係数の間には強い相関性があることを確認している⁹⁾。そのため、空隙率が等しい場合には、ポーラスコンクリートの空隙径が小さいほど、圧縮強度が高くなり、静弾性係数が大きくなることで、弾性波速度は速くなると考えられる。しかしながら、本実験の結果はこの傾向とは逆の傾向を示しており、空隙径が小さいほど、弾性波速度は低下している。この要因としては、POC 試験体と比較して人工空隙試験体の水セメント比が大きく、圧縮強度が低いことや、POC6 シリーズの方が POC7 シリーズよりも水結合材比が小さく圧縮強度が大きいことが要因であると推察される。

以上より、衝撃弾性波法の多重反射法により得られた卓越周波数を用いて算出した弾性波速度はポーラスコンクリートの空隙率と高い相関性を有しており、直線的な関係を示すことが明らかとなった。そのため、多重反射法により得られた弾性波速度を用いることで、ポーラスコンクリートの空隙率を推定できる可能性があると考えられる。なお、ポーラスコンクリートの空隙径と弾性波速度の関係性の検討については今後の課題としたい。

5. ポーラスコンクリートの含水量が打撃応答特性に及ぼす影響

4 章において、衝撃弾性波法の多重反射法を用いて算出した弾性波速度を使用することでポーラスコンクリートの空隙率を推定できる可能性が示された。一方で、ポーラスコンクリートは、湿潤環境での使用が想定されていることから、水分を多く含むことが可能であり、普通コンクリートよりも含水量の影響を受けやすい可能性がある。

そこで、ポーラスコンクリートの含水量が打撃応答特性に及ぼす影響を明らかにするため、POC 試験体を対象に、乾燥状態、湿潤状態、水中状態の 3 水準で衝撃弾性波法の多重反射法により試験を実施した。なお、湿潤状態では、POC 試験体を 48 時間以上水中で飽和させ、引き上げ後 20℃、湿度 60%以下の室内に 2 時間放置し、連

続間隙内部の自由水が抜けたことを確認した上で試験を実施した。水中状態では、乾燥状態の POC 試験体を試験体の上端面から 1 cm の位置まで水中に沈め、試験を行った。

図-6 に一例として POC6 - 27% - 1 試験体の含水量の違いが打撃応答特性に及ぼす影響を示す。各打撃応答特性の測定結果より、POC 試験体は含水量の影響を強く受けることが確認できる。

図-6(a)より空隙中の含水量の増加に伴い、時刻歴応答波形の減衰が大きくなり、時刻歴応答特性が変化している。そこで、最大振幅値からの振幅値を式(3)のように定義し、実験値から最小二乗法により振幅比 ζ を求め、式(4)より対数減衰率を算出した。なお、対数減衰率は正側、負側でそれぞれ算出し、その平均値とした。

$$X = ae^{-\zeta\sqrt{1-\zeta^2}\omega_0 t} \quad (3)$$

$$\delta = 2\pi\zeta \quad (4)$$

ここで、 X は振幅値 (V)、 a は最大振幅値 (V)、 ω_0 は固有周波数 (卓越周波数) (Hz)、 ζ は減衰比、 δ は対数減衰率である。対数減衰率は、乾燥状態では 0.34、湿潤状態では 0.55、水中状態では 2.45 であり、水中状態では乾燥状態と比較して 7.2 倍対数減衰率が増加した。この要因としては、含水量の増加に伴い水の減衰特性の影響が支配的になるためと考えられる。

図-6(b)および(c)より、周波数応答特性においては、空隙中の含水量の増加に伴い、振幅値の減少および、波形形状の鈍化が認められた。これは、弾性波が伝搬経路において、水や空気、骨材界面で散乱拡散し、エネルギーが減少したことや水の減衰特性の影響により、振動に伴う損失係数が増加したためと推察される。

図-7 に含水量による弾性波速度の比較を示す。図には各設計空隙率の No.1 試験体の値のみ示している。湿潤状態では、普通コンクリートと同様に乾燥状態と比較して、弾性波速度が増加する傾向が確認された。一方で、水中状態では、乾燥状態と比較し、全ての試験体で弾性波速度の低下が認められた。この要因としては、ポーラ

スコンクリートと水分との相互作用において、水中状態では湿潤状態と比較して水の影響が支配的になるためであると考えられる。また、ポーラスコンクリートは、空隙内部が完全に水で満たされている場合には、相対的な見かけ密度が上昇し、式(5)に示す関係式より、弾性波速度が低下したものと推察される。

$$V_p = \sqrt{E/\rho} \quad (5)$$

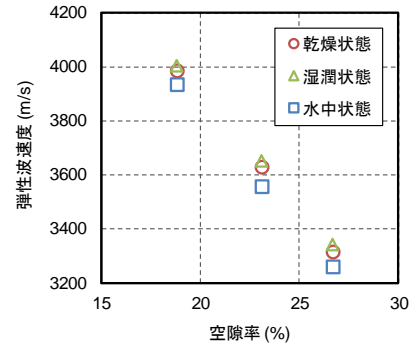
ここで、 V_p は弾性波速度、 E は弾性係数、 ρ は密度である。

以上より、ポーラスコンクリートは、普通コンクリートと同様に、湿潤状態の場合には弾性波速度は増加するが、連続空隙が完全に水で飽和されている水中状態の場合には、水の影響が支配的となり、弾性波速度は低下する傾向が明らかとなった。しかしながら、乾燥状態の弾性波速度を基本とすると、これらの含水量による弾性波速度の変化率は2%程度であり、ポーラスコンクリートの含水量が弾性波速度および空隙率推定に及ぼす影響は比較的小さいものと考えられる。

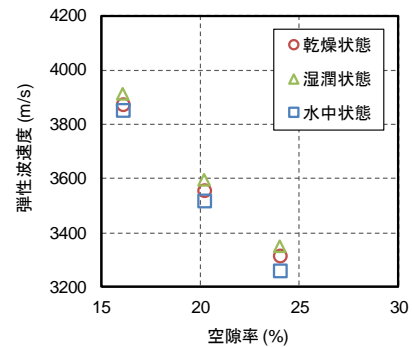
6. まとめ

本論文により得られた知見を以下に示す。

- (1) 加速度センサが測定面に十分に密着している場合には、打撃応答特性は固定方法による影響を受けにくいことが明らかとなった。また、加速度センサの接触面積が大きいほど、測定面の不陸の影響を受けやすく、測定面との密着度が低下することから、測定面の表面性状を考慮して、適切な加速度センサを選択する必要がある。
- (2) POC試験体に対し、キャッピングを行った場合には、キャッピングの前後で得られる打撃応答特性はほぼ等しく、キャッピングを行った場合には、測定値にキャッピングによる影響が含まれることが明らかとなった。そのため、測定面に加速度センサの固定が可能な場合には、キャッピングを行わずに測定を行うことが推奨される。
- (3) 衝撃弾性波法の多重反射法により得られた弾性波速度は、ポーラスコンクリートの空隙率と高い相関性を有しており、空隙率の増加に伴い直線的に低下した。これより、弾性波速度からポーラスコンクリートの空隙率の推定が可能であることが示された。
- (4) 衝撃弾性波法の多重反射法により得られた弾性波速度は、ポーラスコンクリートの空隙内部の含水量の影響を受け、湿潤状態の場合には弾性波速度は増加し、連続空隙が水で飽和している水中状態の場合には、弾性波速度は低下した。しかしながら、その変化率は軽微なものであり、ポーラスコンクリートの空



(a) POC6 シリーズ



(b) POC7 シリーズ

図一七 含水量による弾性波速度の比較

隙率推定において、ポーラスコンクリートの含水量が弾性波速度に及ぼす影響は比較的小さいことが明らかとなった。

謝辞 本研究で使用した POC 試験体は株式会社総合開発様からご提供いただいた。ここに示して謝辞を表す。

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, コンクリートジャーナル, Vol.49, No.4, 2011.4
- 2) 吉田知弘, 国枝稔ら: 超音波法によるポーラスコンクリートの空隙評価に関する基礎的検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.339-340, 2004.9
- 3) 岩野聡史, 實藤大夫: コンクリートの内部欠陥探査における弾性速度の測定方法の比較検討, 土木学会第 68 回年次学術講演会, pp.713-714, 2013.9
- 4) 太田達見, 瀧論: 衝撃弾性波法による壁部材内部の豆板調査に関する実験的検討, コンクリート工学論文集, Vol.35, No.1, 2013.7
- 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会, pp.330-332, 2015.6
- 6) 齋藤俊克, 出村克宣: ポーラスコンクリートの圧縮強度, 静弾性係数及び同弾性係数の関係, セメント・コンクリート論文集, Vol.69, pp.251-256, 2015