

X線CT画像を用いたポーラスコンクリートの空隙形状計測に関する基礎検討

FUNDAMENTAL STUDY OF MEASUREMENT OF PORE SHAPE
IN POROUS CONCRETE BY X RAY CT IMAGE

麓 隆行*・崎本和秀**

by Takayuki FUMOTO and Kazuhide SAKIMOTO

1. はじめに

建設材料で代表的な多孔質材料の一つに、ポーラスコンクリートがある¹⁾。ポーラスコンクリートは、粗骨材の周りにモルタルやセメントペーストなどの結合材を付着させ、粗骨材同士を接点に近い状態で接着させたコンクリートである。透水性舗装、排水性舗装、吸音舗装、河川や海岸での近自然型護岸などに利用されている¹⁾。

一般には市販されている比較的単粒度の粗骨材を用いることが多く、空隙の特徴は数種類程度に絞られる。そのため、現状のポーラスコンクリートにおける空隙特性は、空隙率や骨材径のみで評価され、空隙径、形状、複雑さなどは考慮されていない²⁾。さらに、空隙率の目安はあるが、要求される性能との関係が明確ではない²⁾。ポーラスコンクリートが今後さらに積極的に活用されるためには、それらのことを明らかにする必要がある。

ポーラスコンクリートによる環境改善性能に注目した場合、副産物材料の利用なども含めた多様な形状の粗骨材の利用により、目的に対してより適切な空隙形状を形成することが有用だと考えられる。そのためにも、空隙径の分布、複雑さ、連続性などを評価する手法を確立し、それらと目的とする性能との関係を明らかにすることが重要となる。しかし、空隙の特徴の評価は容易ではない。

著者らは、その空隙の評価手法を確立するための基礎手法として、X線CT法によって得られた3次元画像の画像計測を用いることを考えた。この手法は、既往の研究でも使用されている³⁾。現場での適用は難しい面もあるが、現場手法の開発のための詳細な評価や現象解明のための貴重な手法だと考えられる。近年、計測できる解像度が向上し、より詳細な形状を計測できるようになった⁴⁾。また、画像計測技術や

計算機器の性能も向上したことから、様々な表現ができる^{5), 6)}と考えられる。

本研究では、ポーラスコンクリートへのX線CT画像計測の適用を検討する基礎段階として、粗骨材の粒径やペースト量の異なるポーラスコンクリートの空隙径分布や形状の詳細な検討を試行し、それらの結果と透水試験結果との関係を考察した。

2. 実験概要

2. 1 供試体の作製

ポーラスコンクリートの作製には、水道水(W)、早強ポルトランドセメント(C:密度 3.13g/cm^3)、碎石粉(CSP:兵庫県赤穂産流紋岩、気乾密度 2.47g/cm^3 、平均粒径 $47.9\mu\text{m}$)およびポリカルボン酸系高性能AE減水剤(SP)を使用した。粗骨材には、呼び寸法5、10、15および20mmのふるいを用いて、5-10mm、10-15mm、15-20mmの範囲に分級した3種類の兵庫県赤穂産流紋岩碎石(G)を使用した。粗骨材の物性を表1に示す。

配合を表2に示す。W/Cを25.5%とし、粗骨材の粒径と粗骨材とペーストとの体積比(p/g)を変えた5種類の配合を準備した。p/gを45%とした場合に、粗骨材の粒径を3種類とし、粗骨材の粒径を10~15mmとした場合に、p/g=30、45および60%とした。

容量60Lの強制2軸練りミキサーを使用し、練混ぜ量を43Lとして練り混ぜた。粗骨材質量の1/2、セメント、碎石粉、粗骨材質量の1/2を順に投入し、30秒攪拌し、水および高性能AE減水剤を投入し、90秒攪拌する手順とした。

練上り直後に、既往の研究成果に基づき、一定のエネルギーを上面から与える上面振動締固め試験を行った^{7), 8)}。上面振動締固め試験では、 $\phi 240\text{mm}$ の容器に 7.25kg の試料を2層で投入し、各層25回ずつ突き棒で締め固めた。その上に、振動数 3000rpm 、振幅 1mm の振動機を取り付けて合計 20kg になるようにした装置を静置した。そして40秒間振動させた後の沈下量を測定し、測定結果と配合表から締固め密度ならびに空隙率を算出した。

* 近畿大学准教授 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)

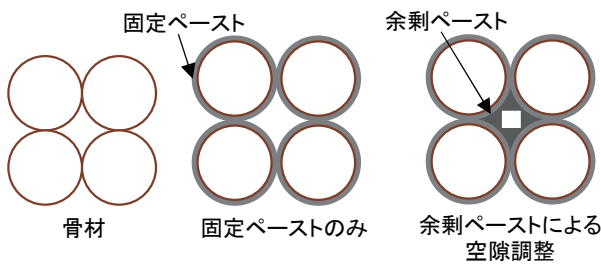
** 近畿大学 理工学部社会環境工学科

表1 粗骨材の物理的品質

粒径範囲 (mm)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	実積率 (%)
5-10	2.60	1.50	60.2
10-15	2.62	1.15	59.6
15-20	2.61	1.04	60.7

表2 実験で使用した配合表

粒径 (mm)	W/C (%)	p/g (%)	単位量(kg/m ³)				SP (C×%)
			W	C	CSP	G	
5-10	25.5	45	97	379	60	1400	0.8
10-15	25.5	30	66	259	41	1443	0.8
	25.5	45	97	382	60	1417	0.8
	25.5	60	126	494	78	1374	0.8
15-20	25.5	45	97	382	60	1418	0.8

図1 ポーラスコンクリートの空隙形成イメージ⁹⁾

算出した空隙率となるように、必要な質量を計量し、2層に分けて、直径100mm、高さ200mmのポーラスコンクリート供試体を作製した。翌日脱型し、室温水中養生後、材齢約5年経過後に本実験に使用した。なお、本研究では、任意の供試体1本を用いて以下2.2～2.4節に示す計測・試験を行った。

2.2 容積法による空隙率の計測

空隙率を、JCIのポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する委員会報告書における「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法（案）」の容積法に準じて計測した²⁾。ノギスで直径と高さを測定した供試体を24時間以上水中に静置した後、水中重量を測定した。その後、室温20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室に24時間静置した後、気中重量の測定を行い、全空隙率 A_t を式(1)により算出した。その後、再び水中重量を測定し、連続空隙率 A_c を式(2)により算出した。また、全空隙率と連続空隙率の差を独立空隙率として算出した。

$$A_t(\%) = \left[1 - \frac{(W_2 - W_1)/\rho_w}{V_1} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$A_c(\%) = A_t - \frac{(W_1 - W_3)/\rho_w}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

ここで A_t : 全空隙率(%), A_c : 連続空隙率(%), W_1 : 供試体の水中重量(g), W_2 : 放置後の気中重量(g), W_3 : 放置後に再測定した水中重量(g), V_1 : 供試体の容積(cm³), ρ_w : 水の密度(g/cm³)である。

また、粗骨材の周辺に付着させたペーストは、骨材表面に付着した固定ペーストと締めめで間隙に移動した余剰ペーストに分けることができる。固定ペーストのみ付着した粗骨材の充填状況と実積率での粗骨材の充填状況とが幾何学的に相似であると仮定すると、図1のように示すことができる⁹⁾。図1に従い、得られた全空隙率を用いて、骨材の間隙率とポーラスコンクリートの空隙率との差から余剰ペースト体積を求め、全ペースト体積と余剰ペースト体積の差から固定ペースト体積を求めた。なお、骨材の間隙率は式(3)より求めた。

$$V_r = 100 - V_g \quad (3)$$

ここで V_r : 骨材の間隙率(%), V_g : 骨材の実積率(%)である。

2.3 画像計測による空隙率の計測

ポーラスコンクリート供試体を、数日間、室内で自然乾燥させた後、写真1に示す近畿大学所有のX線CT装置¹⁰⁾と市販の画像計測ソフトを用いて内部構造を計測した。X線管の電圧を190kV、電流を100μAとし、1辺0.123mmの解像度となるように設定した。供試体高さ200mmを、4つに分割して撮影を行った。

得られた3次元画像を用いて、供試体を底面（打設面とは反対側）からの高さ方向に5mmずつ、計40層に分けて、市販の画像解析ソフトにより空隙形状を計測した。

各層ごとに、画像の濃淡からコンクリートと空隙の閾値となる輝度値を目視にて決定した。ここで、各層の空隙率を算出し、40層での平均値が全空隙率と整合することを確認した。

次に、抽出された空隙内の個々の空隙を特定する粒子分離処理を行った^{5), 6)}。空隙は厚さ5mmの平坦な粒子として分離される。空隙の形状を表現するため、分離した個々の空隙を、同じ断面2次モーメントを有する楕円体で近似した後、近似した楕円体の長軸、中軸および短軸を算出した。3軸のうち5mmに近い軸が高さ方向で、残りの軸が供試体横断面の空隙形状を示すと考えられる。そこで、空隙形状を示す2軸の長さ比を楕円率として算出した。また、その2軸の長さから計算された楕円の面積と等しい面積を有する円の直径をその空隙径として算出した。図2に分離された個々の粒子断面例を異なる濃淡で示す。

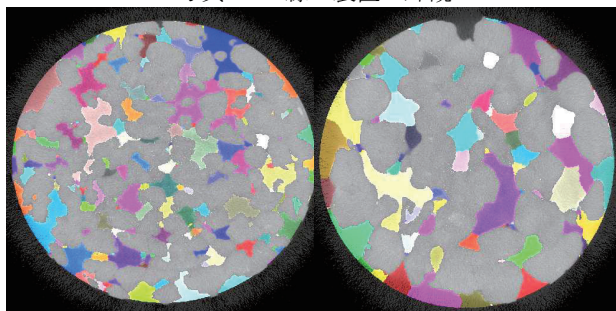
各層で算出された空隙率および空隙径のデータを用いて、市販の表計算ソフトで各層での平均値、最大値、変動係数を算出した。

2. 4 透水試験

透水係数は、JCIのポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する委員会報告書における「ポーラスコンクリートの透水試験方法(案)」に準じた定水位透水試験から求めた²⁾。写真2のように、飽和状態にしたポーラスコンクリートで試験し、式(4)

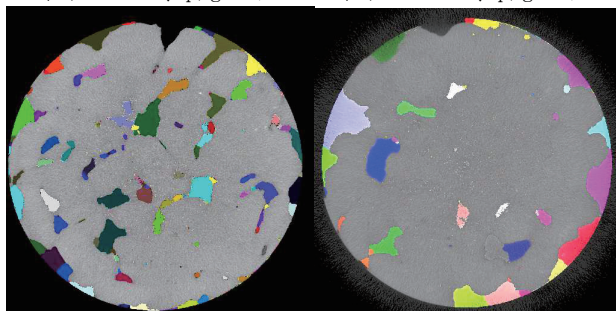


写真1 X線CT装置の外観



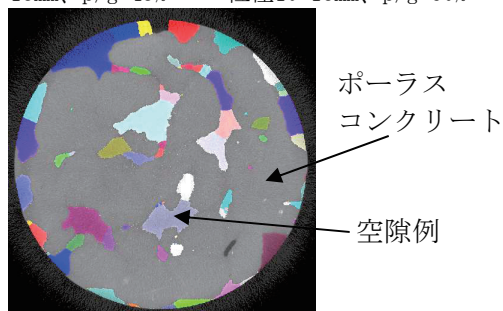
粒径5-10mm、p/g=45%

粒径10-15mm、p/g=30%



粒径10-15mm、p/g=45%

粒径10-15mm、p/g=60%



粒径15-20mm、p/g=45%

図2 粒子分離結果の例

を用いて透水係数を算出した。

$$k = \frac{LQ}{hAt} \quad (4)$$

ここで k : 透水係数(cm/s)、 L : 供試体高さ(cm)、 h : 水頭差(cm)、 Q : 水量(cm^3)、 A : 供試体断面積(cm^2)、 t : 時間(s)である。本実験では、水頭差を4~16cmの範囲で4種類ほど変え、1つの水頭差で水量約3000gとなる時間を3回測定し、平均値を使用した。また、水温15℃に換算して透水係数を求めた。

各配合で供試体を2~5本使用し、透水試験結果のばらつきが少ないことを確認した上で、画像計測を行った1体の供試体で、打設面を上面とした場合(以下、正位置)と下面とした場合(以下、逆位置)で透水試験を実施した。

3. 実験結果と考察

3. 1 空隙について

(1) 空隙率の分布

表3に供試体の空隙率計測結果を示す。いずれの粒径でも全空隙率と連続空隙率はほぼ同じとなり、独立空隙がほとんどなかった。すなわち、透水試験では、すべての空隙が連結していると考えられる。p/gが45%で一定の場合、全空隙率は23.2~24.9%とほとんど変わらない。一方で、粗骨材の粒径を10-15mmと一定にした場合、p/gが大きくなると空隙率が5~7%低下した。画像計測の結果は、全空隙率といずれも2%以下の差にとどまっており、内部の空隙率を

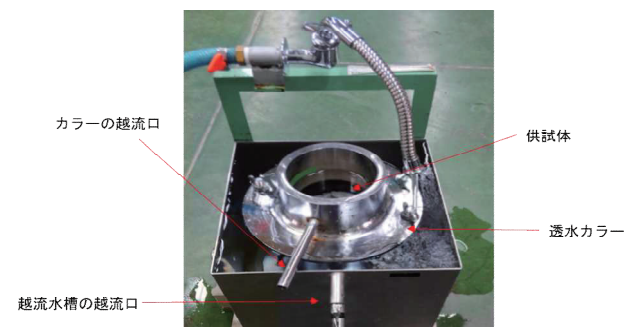


写真2 透水試験の様子

表3 供試体の空隙率計測結果

粒径 (mm)	p/g (%)	容積法			画像計測 全空隙率 (%)
		全空隙率 (%)	連続 空隙率 (%)	独立 空隙率 (%)	
5-10	45	24.9	24.3	0.6	25.8
10-15	30	30.7	30.5	0.2	30.2
10-15	45	23.2	22.9	0.3	21.3
10-15	60	17.3	17.0	0.3	16.5
15-20	45	24.0	23.8	0.2	22.8

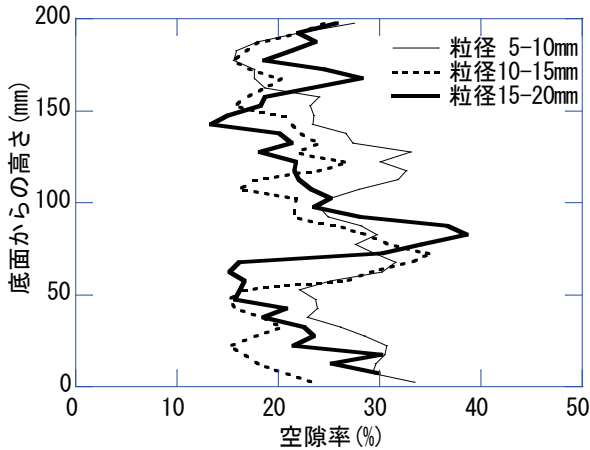


図3 高さ方向の空隙率分布 (粒径)

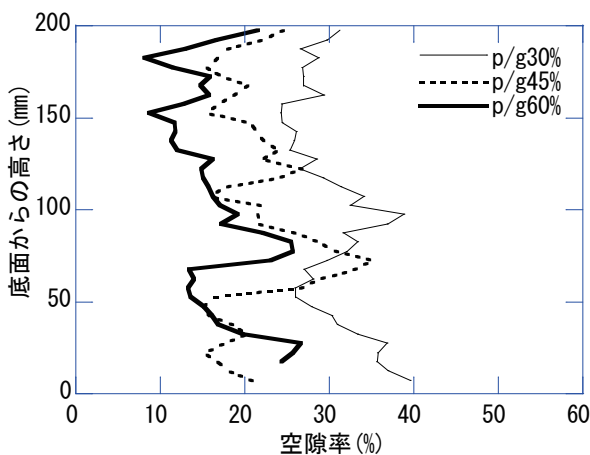


図4 高さ方向の空隙率分布 (p/g)

ほぼ特定できていると考えられる。このことから、2. 3節の手法で得られた画像計測結果を用いて、以降の考察を行った。

図3に、粗骨材の粒径を変えた場合の高さ方向の空隙率の変化を示す。空隙率の変化は15～35%程度の間で変動していた。その傾向は、粒径が変わってもあまり変化していない。

図4に、p/gを変えた場合の高さ方向の空隙率の変化を示す。p/g=60%では空隙率9～28%、p/g=45%では空隙率16～35%、そしてp/g=30%では25～40%の範囲であった。すなわち、変動範囲は20%程度と同程度であるが、p/gが大きいくほど空隙率が高くなった。

ここで、粗骨材周囲のペーストの付着状況について考察する。表4のように、p/gが同じ場合、粗骨材の粒径が変化した場合、空隙率や実積率により多少変動はあるが、余剰ペースト体積は大きく変化しない。したがって、図1での間隙に占める余剰ペーストの体積割合は同程度となると考えられる。これに対して、粗骨材の粒径が同じでも、p/gが増加すると固定ペースト体積も余剰ペースト体積も増加した。

表4 単位骨材体積に対する各ペースト体積

粒径 (mm)	p/g (%)	余剰ペースト体積 (L/L)	固定ペースト体積 (L/L)
5-10	45	0.247	0.203
10-15	30	0.162	0.138
10-15	45	0.288	0.162
10-15	60	0.386	0.214
15-20	45	0.252	0.198

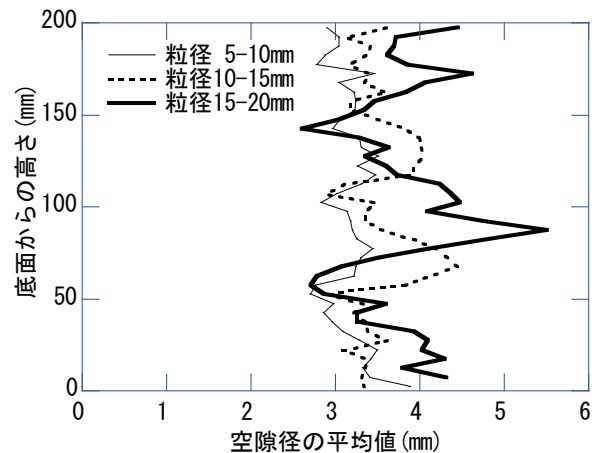


図5 高さ方向の空隙径の平均値の分布 (粒径)

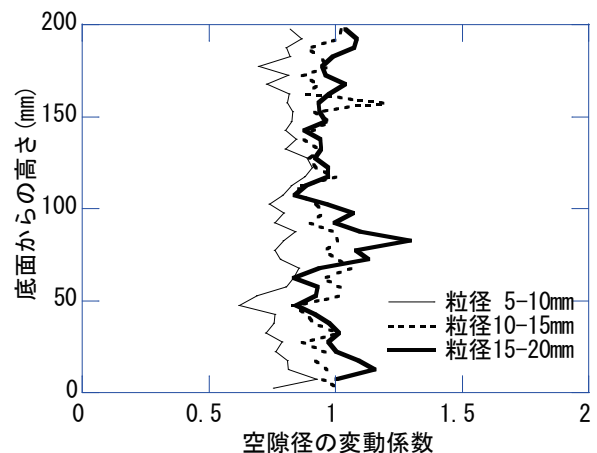


図6 高さ方向の空隙径の変動係数の分布 (粒径)

結果として、図1での間隙に占める余剰ペーストの体積割合が大きくなると考えられる。

(2) 粗骨材の粒径による影響

図5に粗骨材の粒径を変えた場合の高さ方向の各断面での空隙径の平均値を示す。粗骨材の粒径が5-10mmの場合、他に比べて変動が小さく、空隙径2.8～3.5mm程度の範囲に収まっていた。粒径が大きくなると、その変動範囲は大きくなった。粒径10-15mmで空隙径2.9～4.5mm、粒径15-20mmで空隙径2.7～5.5mmであった。すなわち、粒径が5mm大きくなると、空隙径の平均値の下限は同じだが、上限が1mm程度大きくなった。結果として、空隙径範囲が広がった。

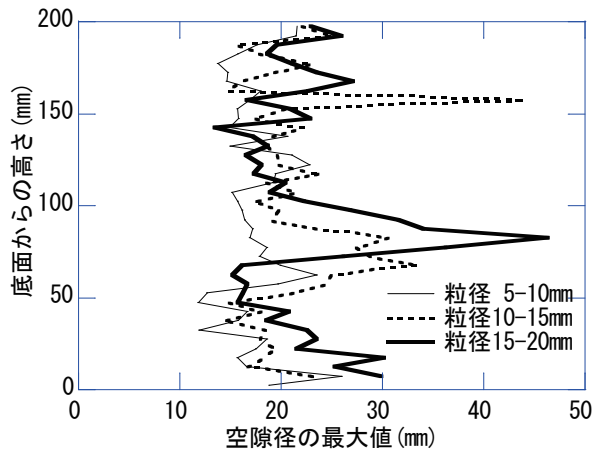


図7 高さ方向の空隙径の最大値の分布 (粒径)

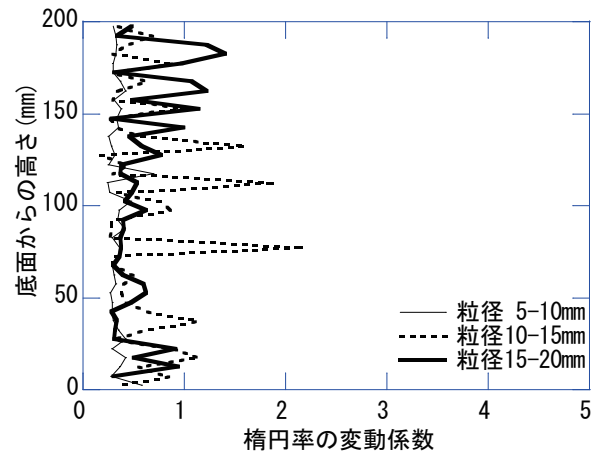


図9 高さ方向の楕円率の変動係数の分布 (粒径)

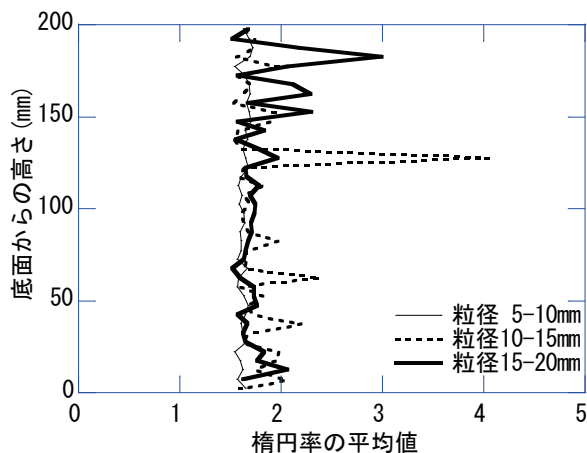


図8 高さ方向の楕円率の平均値の分布 (粒径)

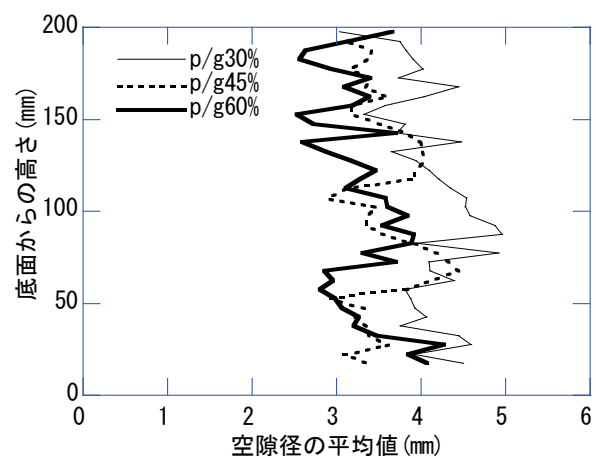


図10 高さ方向の空隙径の平均値の分布 (p/g)

図6に粗骨材の粒径を変えた場合の高さ方向の各断面での変動係数を示す。粗骨材粒径が5-10mmの場合、0.6~0.9と最小だった。粒径が大きくなると、その範囲が大きくなり、0.7~1.3となった。各層での空隙径の変動係数は、空隙径の平均値が大きいほど大きくなる傾向があった。

図7に粗骨材の粒径を変えた場合の高さ方向の各断面での空隙径の最大値を示す。空隙径の最大値は、平均値の5~10倍程度あった。粒径5-10mmでの空隙径の変動範囲は12~26mmだったが、粒径が大きくなると、空隙径の最大値の変動が大きくなった。

図8に粗骨材の粒径を変えた場合の高さ方向の楕円率の平均値を示す。粗骨材粒径が5-10mmであれば、楕円率の平均値はどの層も1.7程度だった。粒径が大きくなっても、1.5~2.0の範囲が多いが、層により2~4程度とばらつくことがあった。

図9に粗骨材の粒径を変えた場合の高さ方向の楕円率の変動係数を示す。粗骨材の粒径が5-10mmであれば、楕円率の変動係数はどの層も0.3程度だった。一方、粒径10-15mmや15-20mmでは大きなばらつきがあるが、0.3~1.0の範囲が多く、層により1~2程度に

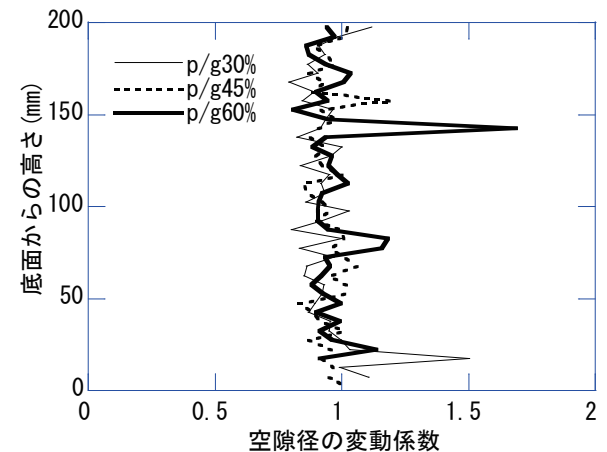


図11 高さ方向の空隙径の変動係数の分布 (p/g)

ばらつくことがあった。粒径が大きくなると、粗骨材の形状の影響が大きくなり、扁平な形状が多くなることを示していると考えられる。

以上から、粗骨材の粒径が5-10mm程度だと、空隙は粗骨材の粒径の1/2程度の大きさで、楕円率も1.7程度となり、高さ方向の変動も小さい。粗骨材の粒径が5mm大きくなると、空隙径の平均値の最大値が1

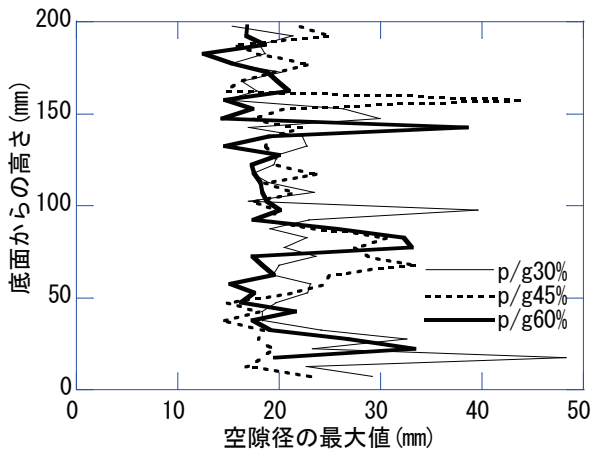


図 1-2 高さ方向の空隙径の最大値の分布 (p/g)

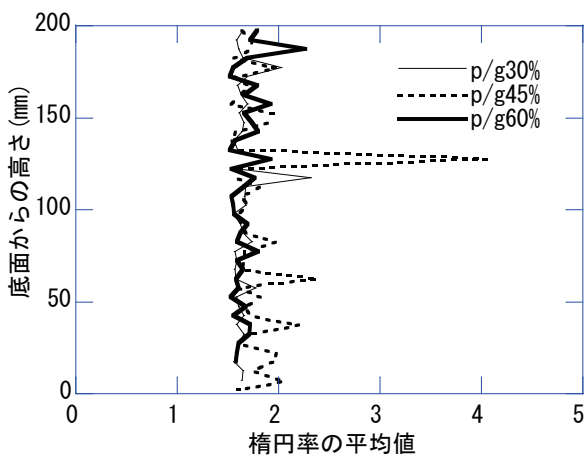


図 1-3 高さ方向の楕円率の平均値の分布 (p/g)

mm程度増加した。空隙径の変動が大きくなる傾向が見られたが、楕円率はあまり変化しなかった。

(3) ペースト量による影響

図 1-0 に、p/gを変えた場合の高さ方向の各断面での空隙径の平均値を示す。p/g=60%の場合、空隙径の平均値が2.5～4.0mm程度の範囲となった。粒径が大きくなると、その空隙径の平均値は大きくなった。p/g=45%で空隙径2.9～4.5mm、p/g=30%で空隙径3.2～5mmであった。すなわち、p/gが15%増加すると、空隙径の最大値と最小値がともに0.5mm大きくなった。

図 1-1 にp/gを変えた場合の高さ方向の各断面での空隙径の変動係数を示す。p/g=60%の場合、端部でのばらつきを除けば0.6～1.0だった。p/gが小さくなるとばらつきが大きくなり、変動係数が1.3～1.7程度と大きくなる層が増えた。これは、ペースト量が少なくなると、粗骨材の形状の影響が大きくなり、空隙が複雑な形状となることを示していると考えられる。

図 1-2 にp/gを変えた場合の高さ方向の各断面での空隙径の最大値を示す。空隙径の最大値は、粗骨材の粒径が変化した場合と同様に、平均値の5～10

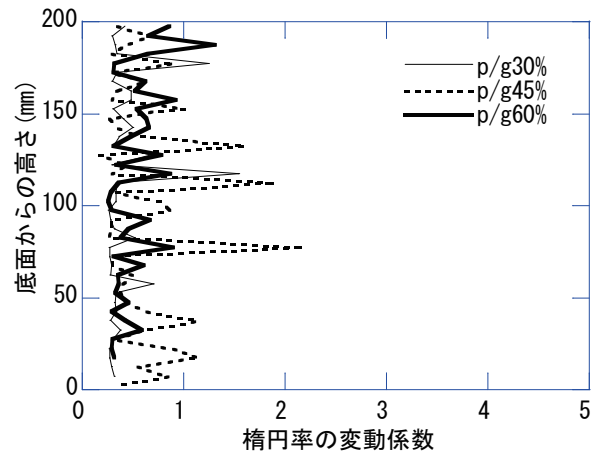


図 1-4 高さ方向の楕円率の変動係数の分布 (p/g)

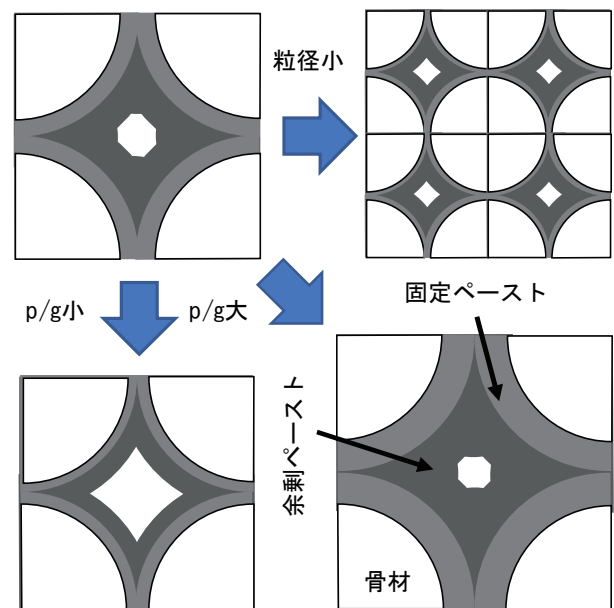


図 1-5 粗骨材の粒径やp/gの変化による空隙形状の変化のイメージ

倍程度あった。p/g=60%での空隙径の変動範囲は12～39mmで、p/gが小さくてもほとんど変化しなかった。

図 1-3 にp/gを変えた場合の高さ方向の楕円率の平均値を示す。いずれのp/gでも楕円率の平均値は1.5～2.3程度で、p/gが大きいと層により2～4とばらつくことがあった。

図 1-4 にp/gを変えた場合の高さ方向の楕円率の変動係数を示す。ばらつきがあるが、平均値と同様に楕円率の変動係数のばらつきも小さく、0.3～1.0程度であった。ただし、変動係数が1.3～2.1となる層もあった。すなわち、同じ粗骨材を使用した場合に、p/gが楕円率の平均値や変動係数にほとんど影響しなかった。

以上から、粗骨材が同じ場合、p/gが15%小さいほど、その空隙径の最大値および最小値は0.5mmほど

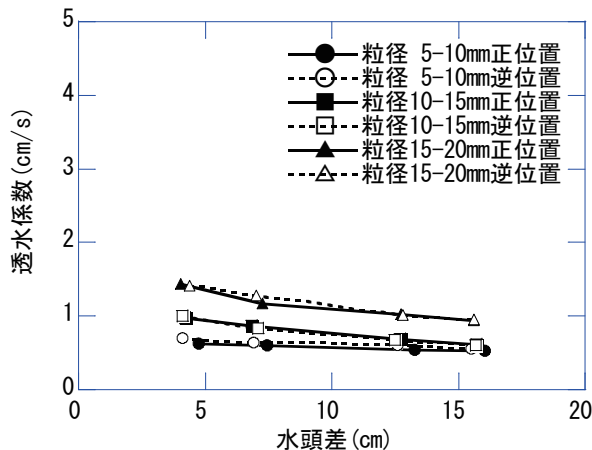


図16 水頭差と透水係数の関係 (粒径)

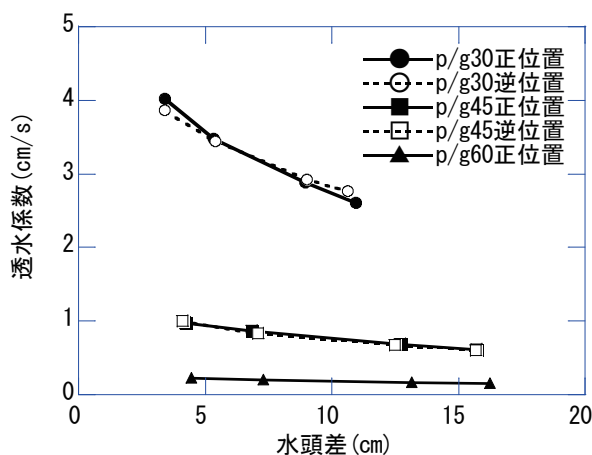


図17 水頭差と透水係数の関係 (p/g)

大きくなり、そのばらつきも大きくなる。一方で、楕円率やそのばらつきは同程度であり、粗骨材が同じであれば、p/gによる空隙形状への影響は小さいと考えられる。

図15に、以上から考えられる本研究での締固め状況下でのポーラスコンクリートの空隙形成イメージを示す。固定ペーストの体積は、p/gが同じだと、粗骨材の粒径が異なっても同程度だった。そのため、空隙に占める余剰ペースト体積は同程度となり、空隙率が同程度となる。すなわち、個々の空隙に対して余剰ペーストが占める割合は同程度となる。その結果、粗骨材の粒径が大きいほど、空隙径の平均値の最大値が大きくなったと考えられる。また粗骨材の粒径が大きいと、粗骨材の形状の影響が大きくなり、楕円率が高く、またばらつきや変動も多くなる。

一方、粗骨材の粒径が同じでも、p/gが小さいと、粗骨材の形状の影響が大きくなり、楕円率が高く、ばらつきや変動も大きくなると考えられる。p/gが大きくなると、固定ペースト体積と余剰ペースト体積がともに増加する。その結果、空隙率が減少するとともに、空隙径や空隙量も減少する。また、一定量

以上の余剰ペーストがあると、空隙の端部も充填され、空隙径の平均値の最小値が大きくなるのではないかと推測されるが、詳細は今後、検討したい。

3.2 透水係数について

p/g=45%で粗骨材の粒径の異なるポーラスコンクリートの透水試験結果を図16に示す。各供試体で、水頭差が大きいほど、透水係数が低下した。これは水頭差が大きいほどポーラスコンクリート内での水流の乱れが大きくなるため、透水係数に影響したものと考えられる。また、その傾向は供試体を上下反転させても変化しなかった。供試体の打設方向に対して上下の影響は小さいと考えられる。粗骨材の粒径が小さいほど、透水係数が小さくなった。そして、水頭差による透水係数への影響も小さくなった。

粗骨材の粒径を10-15mmとして、p/gを変えたポーラスコンクリートの透水試験結果を図17に示す。なお、p/g=60%の正位置の計測が長時間となったため、これまでの傾向から逆位置の計測は実施しなかった。図16と同じく、水頭差が大きくなるほど透水係数が小さくなった。その傾きは、p/gが小さいほど大きくなった。p/g=30%の場合に比べて、p/g=45%の場合に透水係数が3.0cm/s程度小さくなった。p/g=60%の場合、さらに透水係数が0.8cm/s程度小さくなった。供試体の上下を反転させても、ほとんど差は見られなかった。以上から、p/gの変化による透水係数への影響は粗骨材の粒径に比べて大きかった。

以上の結果を、図15のイメージに基づき、ポーラスコンクリート内部の流れを考察する。粗骨材の粒径が大きくなると、空隙率ならびに空隙径の平均値の最小値が同程度で、最大値のみ大きくなった。このため、粗骨材の粒径が大きくなっても透水係数がそれほど大きくならなかったと考えられる。一方で、空隙径の平均値の最大値が大きくなると、大きさや形状の変動が大きくなるため、流れの乱れに影響し、水頭差による透水係数の低下が顕著となったと考えられる。

一方、p/gが小さくなると、空隙率や空隙径の最小値、最大値ともに大きくなるため、透水係数が大きく変化したと考えられる。また、空隙径が大きくなると粗骨材の形状の影響が大きく、大きさや形状が複雑になるため、流れの乱れに影響し、水頭差の増加により透水係数が大きく低下したと考えられる。

以上のように、本研究で用いたX線CT法は、ポーラスコンクリートの空隙率や形状を詳細に検討できるだけでなく、その透水状況を推定することができることがわかった。今後は、空隙の連続性や蛇行性などの検討も加えて、ポーラスコンクリート内部の形状と様々な性能との関係を明らかにしたい。

4. まとめ

本研究では、粗骨材の粒径や p/g が上面振動締固め試験により得られたポーラスコンクリートの空隙形状に及ぼす影響を、X線CT法を用いて詳細に検討し、透水性状との関係を考察した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 本研究で用いたX線CT画像を用いた計測により、透水性状に関わるポーラスコンクリートの空隙率、空隙径および楕円率を計測できる。
- 2) p/g が同じだと、全体の空隙率が同じであっても、粗骨材の粒径が大きいほど、空隙径の平均値の最大値が大きくなったが、その最小値はほぼ同じだった。また粗骨材の粒径が大きいほど、粗骨材の形状の影響が大きくなり、楕円率が高く、そのばらつきや変動も大きくなった。そのため、粗骨材の粒径が大きくなった場合、透水係数はそれほど大きくならないが、流れの乱れが多くなるため、水頭差による透水係数の低下が顕著となった。
- 3) 粗骨材の粒径が同じでも、 p/g が大きくなると、全体の空隙率が減少するとともに、内部の空隙径の平均値の最大値や最小値が減少し、ばらつきも小さくなった。一方、 p/g が小さいと、粗骨材の形状の影響が大きくなり、楕円率が高く、またばらつきや変動も大きくなった。そのため、 p/g が小さくなると、透水係数が急激に大きくなった。一方で、流れの乱れも大きくなり、水頭差による透水係数の低下が大きくなった。

今後、連続性や複雑さなどを評価する試みを追加し、ポーラスコンクリート中の流体の流れに関する空隙特性を解明していきたい。

謝辞

本研究はJSPS科研費 JP16H04421の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) 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（2003）
- 2) 日本コンクリート工学協会：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立に関する委員会報告書（2015）
- 3) 大友鉄平、大塚浩司、武田三弘：ポーラスコンクリートの三次元的空隙性状と植物の生長、セメント・コンクリート論文集、No. 59、pp. 577-584（2005）
- 4) 大谷順：地盤材料を対象としたX線CTの利用の高度化、地盤工学会誌、Vol. 57、No. 11、pp. 16-19、（2009）
- 5) 麓隆行、平井慎一、溝口達也、松本嶺：X線CT画像の3次元粒子計測による碎石の粒子形状の分析、コンクリート工学年次論文集、Vol. 34、No. 1、pp. 70-75（2012）
- 6) 麓隆行：X線CTを用いた3次元画像計測のポーラスコンクリート内部の物性評価への適用性、コンクリート工学年次論文集、Vol. 36、No. 1、pp. 1672-1677（2014）
- 7) 麓隆行、柏木洗一：粗骨材粒子径が碎石粉を用いた舗装用透水性コンクリートの性状に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No. 62、pp. 269-276（2008）
- 8) 麓隆行：上面振動締固め試験によるポーラスコンクリート試験舗装の施工性評価に関する検討、建設用原材料、Vol. 23、No. 1、pp. 27-32（2015）
- 9) 出雲健司：充填シミュレーションの結果を使ったポーラスコンクリートの簡易配合設計法、第62回セメント技術大会講演要旨、pp. 114-115（2008）
- 10) 麓隆行：新しい機構のX線CTの開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への適用、土木学会論文集E2、Vol. 69、No. 2、pp. 182-191（2013）

（2017年6月29日受付 2017年8月9日受理）