

論文 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

麓 隆行*1

要旨: 連続空隙を有するポーラスコンクリートは、環境面、防災面などで重要な役割を担うと考えられている。しかし、その性能を制御するために、ポーラスコンクリートの内部構造と要求性能との関係を明確にする必要がある。内部構造の解明手法として、X線 CT により得られた 3次元画像からの計測を考えた。本研究では、真球度の高いセラミック球を用いた精度確認と、ポーラスコンクリートの内部観察を試みた。その結果、十分な計測精度を有し、ポーラスコンクリートの内部構造の解明できる可能性あることがわかった。

キーワード: ポーラスコンクリート, X線 CT, 3次元画像計測, 粒子径分布, 空隙径分布, ペースト膜厚

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、ペーストで被覆した骨材を適度に締め固めることで作製される。そのため、内部に連続空隙を有し、透水性、保水性、植生など、様々な性能を付与できる。河川護岸をはじめ、透水性舗装や湧水排出性能を持つ法面被覆材料などに応用されてきている¹⁾²⁾。さらに、豪雨対策として、異なる透水性能をもつポーラスコンクリートの積層による透水制御など、さらなる性能向上が求められている³⁾。したがって、ポーラスコンクリートの内部構造を適切に評価し、要求性能との関係を明確にする必要がある。

物質の内部構造を非破壊で 3 次元的に知る方法の一つに X線 CT がある⁴⁾。X線 CT は、X線透過画像から再構成により、物質が X線を吸収した度合い (X線吸収係数) の空間分布を 3次元画像 (以下、X線 CT 画像とよぶ) で表すことができる。ポーラスコンクリートの内部構造の評価にも用いられている⁴⁾。しかし、3次元画像計測によるポーラスコンクリートの内部構造に関する考察はほとんどない。近年、地盤工学では 3次元画像から粒子を推定する手法 (以下、球形分離処理とよぶ) を使用した研究がある³⁾⁵⁾が、骨材やポーラスコンクリートなど、複雑で大きな粒子を解析した例は少ない。

そこで、本研究では、ポーラスコンクリートの内部構造を考察することを目的とし、X線 CT 画像を用いた 3次元画像計測について、真球を用いた粒子および間隙の計測精度の確認およびポーラスコンクリートへの適用性について検討した。

2. X線 CT を用いた 3次元画像計測の概要

2.1 X線 CT の概要

近畿大学所有の X線 CT⁶⁾は、図-1 に示すような開放型マイクロフォーカス X線管 (最大電圧 230kV, 最大電流 1000 μ A) と受感パネルを有している。中央に設置した

供試体の周囲から撮影した X線透過画像から、再構成により X線吸収係数の空間分布を推定し、X線 CT 画像としてデータ化する。一度の撮影範囲は、直径 100mm, 高さ 60mm 程度である。本研究では、0.1226 mm/voxel の画像を使用した。なお、voxel とは、3次元画像の最小要素のことである。

2.2 3次元画像計測の概要

本研究では、3次元画像計測を市販の産業用画像解析ソフトで行った。その手順として、まず実測した空隙率などを用いて計測対象とそれ以外を区別 (2 値化) した。2 値化した X線 CT 画像から、粒子の接触点が大きくくびれることを利用し、球形分離処理により独立した粒子を判別した。その後、各粒子の物性を計測した。

しかし、実際には、粒子は複雑な形状をもつため、球形分離処理には工夫が必要となる。例えば、接触面積が大きいと、くびれが小さく、適切な球形分離処理が難しい。そこで、エロージョン処理⁷⁾を利用する。エロージョン処理とは、各画素と隣り合う画素が、一つでも測定対象外であれば、その画素を測定対象外に置き換える操作を繰り返し、粒子表面を浸食する処理である。適切な回数のエロージョン処理後に、くびれが強調されるため、精度良く球形分離処理を実施できる。ただし、そのままでは粒子体積が減少するため、球形分離処理後にエロージョンと同回数のダイレーション処理 (エロージョン処



図-1 使用した X線 CT

*1 近畿大学 理工学部社会環境工学科准教授 博(工) (正会員)

理の逆手順の処理)を実施し、元の状態に戻した。なお、エロージョン処理やダイレーション処理を実施した場合、元の状態とは微小な誤差を生じる⁵⁾。そこで本研究では、2 値化の閾値を、ダイレーション処理後の体積が実測や理論の体積率と等しくなるように設定した。

一方で、エロージョン処理を行うと、くびれが強調されすぎ、球形分離処理の際に1つの粒子が複数に分割される場合がある。そこで、それらを結合するために近傍削除、近傍同一視および微小粒子統合直径などの条件を設定した⁷⁾。その詳細は、参考文献⁷⁾を参照頂きたい。

また、表面積を計測する際に、voxel 表面で実施すると、立方体の表面を計測することとなり、誤差が生じる可能性がある。これに対して、各 voxel がもつ濃淡情報をもとに等値面を推定する手法(マーチング・キューブ法⁸⁾など)がある。これにより、粒子を等値面で囲まれた粒子として計測でき、表面積が精度良く測定できると考えられる。そこで、本研究では、2 値化画像と濃淡画像から三角面を作成し、表面積を計測する方法(以下、Isosurface 法と呼ぶ)を適用し、計測した。

3. セラミック球を用いた 3 次元画像計測

3.1 実験概要

セラミック製真球を対象に、精度の検証を行った。粒子径および表面積の計測では、直径 2.38mm (相互差 0.02 μm, 真球度 0.025 μm) および直径 14.29mm (相互差 0.04 μm, 真球度 0.081 μm) を、それぞれ 35 個ずつ塩ビ管内にランダムに積み重ねて、X 線 CT にて撮影した。

一方、粒子間隙を計測する際には、図-2 のように直径 2.38mm のセラミック球を立方最密充填構造(面心立方格子構造)となるように、上から 1, 3, 6, 10, および 15 個集積し、X 線 CT による撮影を行った。

X 線管の電圧を 120~140kV, 電流を 50μA として撮影した。なお、表-1 に画像計測条件を示す。

3.2 実験結果と考察

(1) セラミック球の粒子に関する 3 次元画像計測

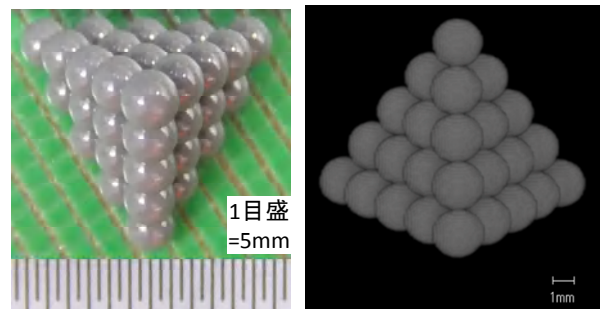
表-2 に、画像解析により得られた粒子体積, 球相当直径ならびにアスペクト比を示す。直径 2.381mm のセラミック球を計測した結果, その平均値は, 2.375mm とな

り, 誤差は 0.25% であった。最小値 2.344mm, 最大値 2.397 であり, 標準偏差は 0.011mm であったことから, 変動係数は 0.46% と小さかった。アスペクト比は 1.023 と 2% ほどの誤差があった。

一方, 直径 14.288mm のセラミック球を計測した結果, その平均値は, 14.290mm となり, 誤差は 0.01% であった。最小値 14.266mm, 最大値 14.305 であり, 標準偏差は 0.010mm であり, 変動係数は 0.06% と小さかった。アスペクト比は 1.006 となり, その誤差も 0.6% と小さい。

以上の結果から, 7 号砕石相当の直径 2.5mm の粒子を用いたポーラスコンクリートの計測であっても, 十分な精度があると考えられる。また, 粒子径が大きくなるほど, 誤差は小さくなるのがわかる。また, アスペクト比は 2% 以上の差があれば, 有意な形状の差と見なせると考えられる。

表-3 に, セラミック球の表面積に関する計測結果を示す。粒子体積を真球の理論値に合わせるように 2 値化しているため, 粒子体積の誤差は 1% 以下となった。こ



積み上げた状況 X 線 CT 画像
図-2 セラミック球を積み上げた様子

表-1 セラミック球の粒子に関する画像計測条件

対象		粒子	間隙
エロージョン	回数	無	無
近傍	削除(直径 x)	1.0	1.0
	同一視(直径 x)	1.0	1.0
ダイレーション	回数	無	無
微小粒子統合直径(mm)		1.0	0

表-2 セラミック球の粒子に関する 3 次元画像計測の結果

球径(mm)	項目	理論値	平均	分散	標準偏差	最小	最大
2.381	粒子体積(mm ³)	7.055	7.011	0.009	0.097	6.744	7.211
	球相当直径(mm)	2.381	2.375	0.000	0.011	2.344	2.397
	アスペクト比	1.000	1.023	0.000	0.008	1.004	1.038
14.288	粒子体積(mm ³)	1523.92	1527.95	10.65	3.26	1520.13	1532.75
	球相当直径(mm)	14.288	14.290	0.000	0.010	14.266	14.305
	アスペクト比	1.000	1.006	0.000	0.003	1.002	1.016

表-3 セラミック球の表面積に関する3次元画像計測の結果

粒子径 (mm)	条件	体積 (mm ³)	表面積 (mm ²)	比表面積 (1/mm)	体積誤差 (%)	表面積誤差 (%)
2.381	理論値	7.055	17.786	2.521	—	—
	Isosurface 法無	7.011	20.494	2.923	0.624	-15.225
	Isosurface 法有	7.063	17.425	2.467	-0.120	2.032
14.288	理論値	1523.92	640.30	0.420	—	—
	Isosurface 法無	1527.95	773.70	0.506	-0.264	-20.834
	Isosurface 法有	1523.72	644.08	0.423	0.014	-0.590

のとき、Isosurface 法を用いず voxel 表面で表面積を算出した場合の誤差は 15~20%と大きくなった。これに対し、Isosurface 法を適用した場合、粒径 2.381mm で 2%程度、粒径 14.288mm で 0.6%程度の誤差となった。すなわち、表面積の計測には Isosurface 法の適用が必要であり、その適用で 2%以下の誤差となることがわかった。なお、対象の粒子径が大きいほど、誤差が小さくなった。

(2) セラミック球の間隙に関する3次元画像計測

ピラミッド状に積み上げた立法最密充填構造では、図-3 のような 4 つの球によって囲まれた三角孔と、6 つの球によって囲まれた四角孔の 2 種類の間隙が交互に連結している⁹⁾。

三角孔の体積 V_T は、取り囲む 4 つの球体の中心を頂点とする正四面体の体積を V_t 、正四面体内に切り取られる球体の体積を V_b とすると、式(1)から求められる。

$$V_T = V_t - V_b \tag{1}$$

正四面体の体積 V_t は、式(2)により求められる。

$$V_t = \frac{1}{3} \times \left(\frac{1}{2} \times s \times \frac{\sqrt{3}}{2} s \right) \times \frac{\sqrt{2}}{3} s = \frac{\sqrt{2}}{12} s^3 \tag{2}$$

ここで、 s は正四面体の 1 辺の長さであり、今回の場合、球の直径 $d = 2.381\text{mm}$ に等しい。

V_b は、各頂点の立体角¹⁰⁾を用いて求めることができる。立体角は、2次元における角の概念を3次元に拡張した概念であり、正多面体の頂点がなす角度を、頂点を中心とした半径 1 の球面を正多面体の錐面が切り取った面積で表される。よって、全立体角（錐によって切り取られない場合）は 4π である。三角孔の場合、正四面体の 1 頂点の立体角 α は、球面三角形¹⁰⁾に関する公式から、式(3)により求めることができる。

$$\alpha = 3\theta_4 - \pi \tag{3}$$

ここで、 θ_4 は正四面体の隣り合う面が交差する角度で、1.23096 rad である¹⁰⁾。すなわち、 $\alpha = 0.55129$ sr (ステラジアン) となる。そこで、 α を用いれば、正四面体内に切り取られる球体の体積 V_b は、式(4)により求められる。

$$V_b = \frac{1}{6} \pi d^3 \times \frac{\alpha}{4\pi} \times 4 = \frac{0.55129}{6} d^3 \tag{4}$$

したがって、式(1)より、三角孔の体積 V_{T3} は、式(5)の

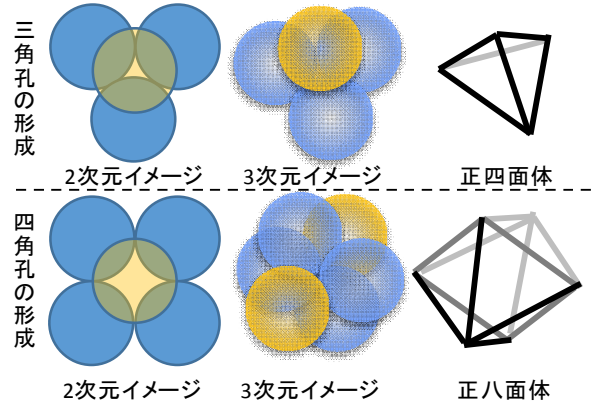


図-3 最密充填構造における間隙形状の種類

ように求まる。

$$V_{T3} = V_t - V_b = \frac{\sqrt{2}}{12} d^3 - \frac{0.55129}{6} d^3 = 0.3505 \tag{5}$$

次に、四角孔の場合も同様に式(1)から求められる。正八面体の体積 V_t は、式(6)により求められる。

$$V_t = \left(\frac{1}{3} \times s^2 \times \frac{\sqrt{2}}{2} s \right) \times 2 = \frac{\sqrt{2}}{3} s^3 \tag{6}$$

ここで、 s は正八面体の 1 辺の長さであり、今回の場合、球の直径 $d = 2.381\text{mm}$ に等しい。

また、正八面体の 1 頂点の立体角 β は、球面三角形から式(7)から求めることができる。

$$\beta = 4\theta_8 - 2\pi \tag{7}$$

ここで、 θ_8 は、正八面体の隣り合う面同士が交差する角度を面交差角であり、1.91063 rad である¹⁰⁾。すなわち、 $\beta = 1.35935$ sr となる。そこで、 β を用いれば、正八面体内に切り取られる球体の体積 V_b は、式(8)により求められる。

$$V_b = \frac{1}{6} \pi d^3 \times \frac{\beta}{4\pi} \times 6 = \frac{1.35935}{4} d^3 \tag{8}$$

したがって、式(1)より、四角孔の体積 V_{T4} は式(9)のように求まる。

$$V_{T4} = V_t - V_b = \frac{\sqrt{2}}{3} d^3 - \frac{1.35935}{4} d^3 = 1.776 \tag{9}$$

なお、本研究のようにピラミッド状に積み上げた場合、三角孔が 24 個、四角孔が 10 個存在することになる。

表-4 セラミック球の間隙に関する画像計測の結果

対象	理論値			画像計測値		
	体積 (mm ³)	直径* (mm)	個数	体積 (mm ³)	直径* (mm)	個数
三角孔	0.351	0.87	24	0.26~0.31	0.79~0.83	3
四角孔	1.776	1.50	10	2.33~2.83	1.64~1.75	10

*体積から計算された球相当直径



図-4 セラミック球の間隙分離状況

以上の計算結果と、X線CTによる3次元画像解析の結果を表-4に示す。三角孔の体積は0.26~0.31mm³、四角孔の体積は2.33~2.83mm³となった。そして、三角孔が2個、四角孔が10個となった。すなわち、三角孔はほとんど計測されず、四角孔の体積は理論値よりも0.55~1.05mm³大きくなった。

ここで、セラミック球の間隙について分離された間隙を色分けし、図-4に示す。適切な球形分離処理が行われず、三角孔と四角孔が複数個結合している様子がわかる。そこで、表-5に、四角孔と三角孔が複数個結合したと仮定し、その組み合わせによる理論値を計算し、画像計測で得られた粒子体積との関係を調べた結果を示す。四角孔に対して、三角孔を2および3個結合したと考えた場合、間隙体積は2.47mm³および2.82mm³となった。一方、計測された四角孔の内訳は2.33~2.68mm³が8個、2.74~2.83mm³が2個であった。これを考慮すると、四角孔10個、三角孔24個となり、理論数と同じになった。これは、間隙同士が大きな面で接するため、適切な球形分離処理が難しかったことが原因と考えられる。

間隙は複雑な形状で、精度よく評価する方法はほとんどない。本手法で求めた間隙径分布は、結合による誤差に配慮する必要があるが、その傾向を把握するうえでは、有用な情報を有していると考えられる。

4. ポーラスコンクリートを用いた3次元画像計測

4.1 ポーラスコンクリートの製造と計測条件の概要

早強ポルトランドセメント（密度 = 3.13 g/cm³，比表面積 = 4550cm²/g，50%D = 13.3μm），砕石粉（硬質砂岩，密度 = 2.47g/cm³，50%D = 40.0μm）を使用した。赤徳産流紋岩砕石を、目開き4.75mmおよび9.5mmのふるいで分級して粗骨材とした。粗骨材の表乾密度は2.60g/cm³，

表-5 結合を考慮した理論値と画像計測結果との比較

間隙種別		理論値	画像計測値	
四角孔	三角孔	体積 (mm ³)	体積 (mm ³)	個数
1	0	1.77	—	0
0	1	0.35	0.26~0.31	2
1	1	2.12	—	0
1	2	2.47	2.33~2.68	8
1	3	2.82	2.74~2.83	2

表-6 ポーラスコンクリートの配合

W/C (%)	p/g* (%)	単位量(kg/m ³)				SP (C×%)
		W	C	CSP	G	
25.5	45	107	420	66	1551	0.8

*p/gは、粗骨材とペースト(W+C)との体積比である。

吸水率は1.5%、実積率は59.6%であった。

ポーラスコンクリートの配合を表-6に示す。ペーストと粗骨材の体積比p/g = 45%、W/C = 25.5%、そしてポリカルボン酸系高性能AE減水剤をC×0.8%とした。さらに、砕石粉をセメントペースト全体積の10%添加した。強制二軸練りミキサーを用いて、粗骨材(1/2)、砕石粉、セメント、粗骨材(1/2)の順にミキサーに入れて30秒練混ぜた後、水と高性能AE減水剤を入れ90秒練混ぜる手順でポーラスコンクリートを作製した。

フレッシュ性状の評価として上面振動締め試験¹¹⁾から算出した締め密度と、配合表から求めた空隙がない場合の理論密度との関係から空隙率を求めた。その結果、空隙率は24.4%であった。

その空隙率となるように試料を突き棒と振動機を用いて、型枠に詰め込んだ。供試体は、直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を5本作製した。打設翌日に脱型し、材齢7日まで20°Cで水中養生した。

供試体のうち任意の1体について、既報⁷⁾を勘案し、直径100mm、高さ中央から±20mmを対象範囲とし、X線CTによる撮影を行った。X線CTでの撮影は管電圧145kV、管電流85μA、プロジェクション数1200、0.1226mm/pixelで行った。また、比較として粗骨材を塩ビ管容器に詰め、X線CTでの撮影を、管電圧135kV、管電流80μA、プロジェクション数を1200で実施した。得られた再構成画像を用いて、試験体の空隙率となるように閾値を選定し、表-7に示す条件で3次元画像計測を行った。画像解析では、砕石とポーラスコンクリートの粒子径分布および空隙径分布、ならびに砕石の比表面積を算出した。

4.2 計測結果と考察

図-5~8に、ポーラスコンクリートの撮影前の試験体端面、X線CTにより得られた再構成画像、粒子分離状況、空隙分離状況を示した。計測範囲は円柱であるが、

表-7 ポーラスコンクリートに関する画像解析条件

条件	砕石		ポラコン	
	粒子	間隙	粒子	空隙
エロージョン(回)	3	0	3	0
近傍削除(粒子半径×倍)	1.0	1.0	1.0	1.0
近傍同一視(粒子半径×倍)	1.4	1.0	1.0	1.0
ダイレーション(回)	3	0	3	0
微小粒子統合直径(mm)	2.0	0.2	2.0	0.2



図-5 試験体の端面

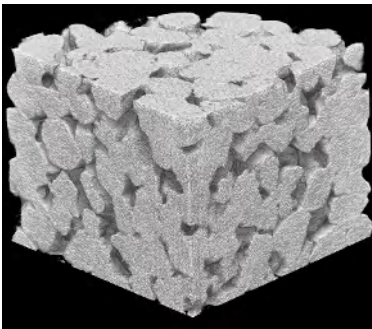


図-6 ポーラスコンクリートのX線CT画像(1/4切断)

断面を確認できるように1/4に切断した画像を示した。分離された粒子や空隙を256色に塗り分け、視覚的に表示している。ポーラスコンクリートの球形分離処理では、おおよそ粒子として判別されているが、表面の凹凸の影響で1つの粒子が分割される場合もある。空隙への球形分離処理では、凹凸がより複雑で、小さな粒子に分割される場合がさらに目立つ。

図-9にポーラスコンクリートの粒子計測を行った結果を示す。なお、粒子形状は扁平だが、直感的な傾向の比較を目的として、球相当直径1mmごとの体積割合分布を表示した。ポーラスコンクリートの粒子径は、3~13mmの粒径範囲で、平均値は8.94mmとなった。一方、使用した砕石は3~11mmの粒径範囲で、平均値は8.31mmと、ポーラスコンクリートに比べて小さかった。この差は、ポーラスコンクリートでは、ペーストが砕石を被覆していることに起因すると考えられる。そこで、ペースト総体積を配合から算出し、粗骨材の総表面積で除して、粗骨材周囲のペースト膜厚を求めた。砕石の比表面積をX線CT画像から計測すると $0.9403\text{mm}^2/\text{mm}^3$ (球

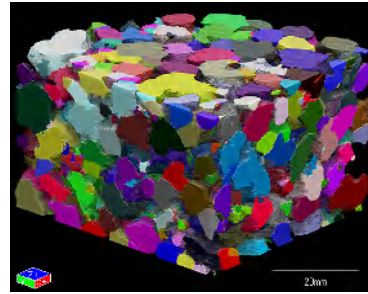


図-7 ポーラスコンクリートの粒子分離状況(1/4切断)

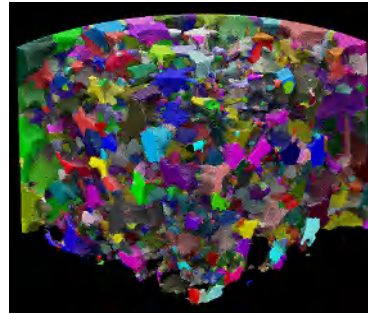


図-8 ポーラスコンクリートの空隙分離状況(1/4切断)

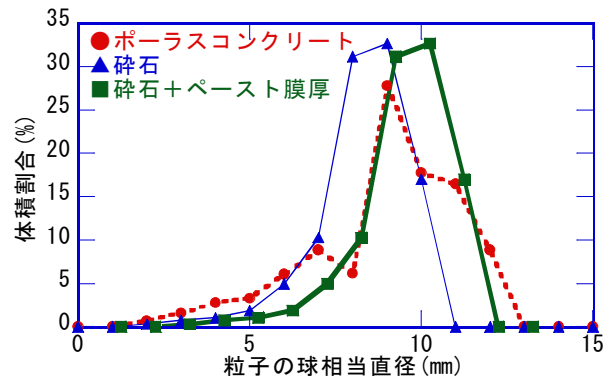


図-9 ポーラスコンクリートと砕石の粒子径分布

相当径分布から粗骨材を球形と仮定して算出した場合の1.297倍)であった。このことから、ペースト膜厚は0.4803mmと算出された。この厚さのペーストが被覆した粗骨材(ポーラスコンクリート粒子)の体積は、粗骨材と同体積の球に $1.297 \times 0.4803\text{mm}$ の厚さのペーストが被覆した体積と等しいと考えられる。したがって、図-10のように、粗骨材の球相当直径に $1.297 \times 0.4803\text{mm}$ の2倍の厚さを加えるとポーラスコンクリート粒子の球相当直径と近似できる。図-9に、算出されたポーラスコンクリート粒子径分布を■印で示した。その結果、粗骨材にペースト膜厚を加えた粒径範囲は、およそ4~12mmで、平均値は9.27mmとなった。すなわち、ポーラスコンクリートの場合と砕石とペースト膜厚を加算した場合は、頻度の高い粒径範囲がほぼ同じであった。以上から、砕石に、ペーストが比較的均等に被覆したと考えられる。

図-11に間隙または空隙分離処理の後の結果を示す。なお、形状が複雑であるが、直感的な傾向の比較を目的

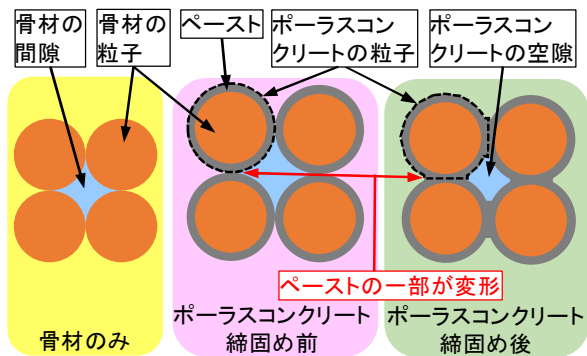


図-10 ポーラスコンクリートの締固めと空隙形成

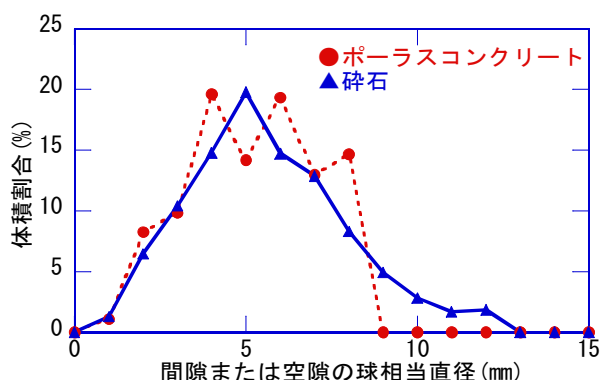


図-11 ポーラスコンクリート空隙と砕石間隙の分布

として、ここでは球相当直径 1mm ごとの体積割合分布を表示した。なお、ポーラスコンクリートの空隙は直接計測しており、図-10 に青色で示すように、計測範囲にペーストを含まない。ポーラスコンクリートの空隙は、球相当直径 9mm 以下であり、平均値は 5.21mm であった。一方、砕石の間隙は球相当直径 13mm 以下であり、平均値は 5.62mm で、2 つの分布の差は小さい。なお、砕石の場合、球相当直径 10~12mm の間隙があるが、型枠側面の間隙や複数間隙の統合による誤差だと考えられる。

ここで、砕石の間隙率 (100%-実積率) は 40.4%、ポーラスコンクリートの空隙率は 25.4% と異なる。すなわち、図-10 のように、ペーストが砕石をほぼ均一に被覆し、本実験の方法で締固めた結果、ポーラスコンクリートの空隙は、もとの砕石の間隙とほぼ同程度の体積となったと考えられる。今回は、1 体のみ結果であるが、今後、この傾向の再現性を確認していく予定である。

以上のように、X 線 CT を用いた 3 次元画像計測はポーラスコンクリートの内部構造の評価に有効な手段だと考えられ、今後、施工方法や要求性能との関係を明確にしていきたいことが期待される。

5. 結論

本研究で得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) X 線 CT から得られた 3 次元画像を用いた画像計測

は、ポーラスコンクリートの内部構造の解明に有効である。

- (2) 本研究での画像計測手法でセラミック球の粒子径を計測した結果、誤差は 0.25% 以下で、標準偏差は 0.01mm 程度であった。また、Isosurface 法を用いれば、表面積の誤差は 2% 以下となった。
- (3) 本研究での画像計測手法でセラミック球の間隙を計測すると、接合面が大きいので、小さな間隙を統合してしまうものの、傾向は把握できる。
- (4) 本研究での画像計測手法で砕石とポーラスコンクリートの内部構造を考察した結果、ポーラスコンクリート内部における、ペーストが粗骨材に被覆している状態や締固めによる空隙構造の特性の推定が可能である。

参考文献

- 1) 先端建設技術センター：ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き，山海堂，2001。
- 2) 日本コンクリート工学会：性能設計対応型ポーラスコンクリートの施工標準と品質保証体制の確立に関するシンポジウム，JCI-C85，2013
- 3) 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. 16-19，2009.11
- 4) 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。
- 5) 松島亘志，上杉健太郎，中野司，土山明：SPring-8 マイクロ X 線 CT による粒状体の 3 次元微視構造の定量化，応用力学論文集，Vol. 11，pp. 507-515，2008。
- 6) 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.182-191，2013.4
- 7) 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砕石の粒子形状の分析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 66，No. 1，pp. 70-75，2012。
- 8) 剣持雪子，小谷一孔，井宮淳：点の連結性を考慮したマーチング・キューブ法，電子情報通信学会技術研究報告，Vol. 98，No. 528，pp. 197-204，1999。
- 9) 三輪茂雄：粉体工学通論，日刊工業新聞社，p.39，1996。
- 10) 一松信：正多面体を解く，東海大学出版会，pp. 15-51，2002。
- 11) 麓隆行，柏木洗一：粗骨材粒子径が砕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.269-276，2009。