

砕石粉を用いたポーラスコンクリートの 締固め性状に及ぼすペースト性状の影響

INFLUENCE OF PROPERTY OF PASTE
TO COMPACTION PROPERTY OF POROUS CONCRETE WITH CRUSHED STONE POWDER

麓 隆行*・新木本尚志**

by Takayuki FUMOTO and Hisashi SHINKIMOTO

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、連続空隙を有することで、透水、透気、そして植生等、特徴のある性能を有するコンクリートである¹⁾。しかし、経験的な配合設計による試験的な使用に限定されてきた。したがって、空隙率が実現できる性能を明確にしたポーラスコンクリートの性能設計手法の確立が望まれていた。2015年6月には、舗装や河川護岸に関する設計や施工指針試案が提案された²⁾。今後も、空隙の特性とポーラスコンクリートの性能との関係を明確にしたデータ収集が重要であると考えられる。

ポーラスコンクリートの性能は、空隙構造に大きな影響を受ける。空隙構造は、ペーストやモルタルの流動性や粘性により変化する。その粘性の調整には、一般的に粉体や高分子材料を使用する。著者は、資源の有効利用を考え、増粘効果をえるために砕石粉を混合することを考えてきた。これまでの検討では、締固め評価指標³⁾、砕石粉の物理的性質と締固め度との関係⁴⁾を明らかにしてきた。

本研究では、同じ空隙状態を作製するための条件を明らかにすることを目的に、砕石粉を混入したポーラスコンクリートの締固め性状に影響を及ぼすペースト性状について検討した。

2. 既往の研究成果に基づく配合での検討

2.1 使用材料

表1に使用した材料の種類と主な品質を示す。水道水、早強ポルトランドセメント、兵庫県産流紋岩砕石、兵庫県産流紋岩砕石粉、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤および消泡剤を使用した。砕石と砕石粉は、同じ砕石工場で採取した試料である。砕石は、粒径5~15mmのコンクリート用砕石であり、実積率は59.4%であった。砕石粉は、砕石、砕砂製造時に電気集塵機で回収された粉体を開き目0.15mmのふるいでふるって、気乾状態で使用した。また、混和剤として、粉体系であることを考慮し、高い分散性

を有する高性能AE減水剤を使用することとした。

2.2 配合

既往の研究成果に基づき、砕石粉を添加して締固め度、すなわち同じエネルギーを与えた際に空隙率が同程度となるポーラスコンクリートの配合を作成した。

表2にその配合表を示す。砕石粉の混入率をペースト体積の内割で0、5および10%とした3種類のペーストに対して、それぞれポーラスコンクリートの空隙率を18、23および28%を目標とした9種類を用意した。なお、同程度の締固めエネルギーで目標空隙率とするため、既往の研究成果^{3),4)}に基づき、ペースト量を決定した。そのため、砕石粉を用いた場合、ペーストの粘性が高くなり、締固めに大きなエネルギーが必要となるため、砕石粉を混入しない場合に比べてペースト量が多い配合となった。

2.3 練混ぜおよびフレッシュ性状試験

強制2軸ミキサを用いて、粗骨材、砕石粉を10秒攪拌後、セメントを追加して10秒練り混ぜた。その後、羽根の回転速度を下げて、高性能AE減水剤と消泡剤を混合した水をゆっくりと注いだ。羽根の回転速度をもどし、90秒練混ぜた後、かき落としを行い、再度90秒練混ぜて、ポーラスコンクリートを製造した。

フレッシュ状態に関して、締固め性状を調べるた

表1 使用材料

種別	記号	使用材料および品質
水	W	水道水
セメント	C	早強セメント、密度 3.16g/cm ³
砕石粉	CSP	兵庫県産流紋岩、絶乾密度 2.47g/cm ³ 、平均粒径 47.9μm、BET 比表面積 4.28m ² /g
粗骨材	G	兵庫県産流紋岩 6号砕石、表乾密度 2.60g/cm ³ 、吸水率 1.50%、実積率 59.4%
混和剤	SP	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤
消泡剤	—	全配合で C×0.004% 添加

* 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

め、上面振動締固め試験³⁾を実施した。この試験は、著者が提案した試験方法であり、直径 240mm、高さ 200mm の鋼製容器に、試料 7.25kg を突き棒で 2 層、各 25 回突き固めた後、振動数 3600rpm、振幅 1mm の振動機を固定した鋼板(合計 20kg)を試料上面に設置し、所定の時間振動後の試料の沈下量を 4 カ所計測し、その平均値から締固め密度を算定する。そして、配合から求まる空隙率 0%の試料密度との比から、空隙率を求めた。なお、本研究において、上面振動締固め試験は、同一エネルギーでの締め固めに対する変形抵抗性を示していると考えている。

ここで、図 1 のように、ポーラスコンクリートのペーストは、骨材周囲で変形しない固定ペーストと、変形して骨材間距離を縮め、空隙を充填する余剰ペーストに分けられる。固定ペーストが骨材表面に均一に付着すると仮定すると、骨材のみの場合と固定ペーストのみが付着した状態は、幾何学的に相似関係にあると仮定できる。よって、ポーラスコンクリートの空隙率は骨材の間隙率と等しくなる。そして、ポーラスコンクリートの空隙率は、骨材の間隙に移動する余剰ペースト体積によって決まる。

本研究では、図 1 のイメージ図に従い、固定ペーストのみの場合、その空隙率は幾何学的に骨材の間隙率(=100%-実積率)と同じと仮定した。したがって、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、全ペーストと余剰ペーストの差から固定ペーストの体積を求めた。

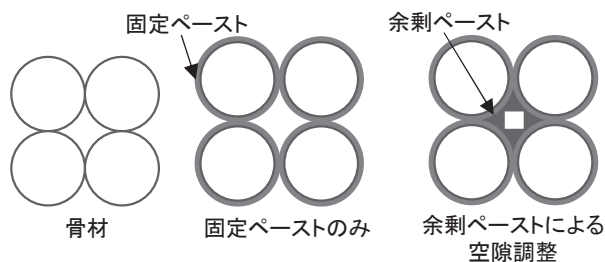


図 1 ポーラスコンクリートの空隙形成イメージ

以上から、上面振動締固め試験では、上面からの一定のエネルギーを与えて移動しない骨材表面の固定ペースト体積を評価していることになる。固定ペースト体積は、ペーストの変形抵抗性と振動機の性能等により異なると考えられる。

2. 4 ペースト性状試験

考察のため、粗骨材を除いた材料を、表 2 の配合比で混合したペーストを作製した。小型ミキサで、セメント、碎石粉を低速で 30 秒間練り混ぜた後、混和剤と水を 30 秒間低速で練り混ぜながら投入した。その後、低速で 120 秒間、高速で 240 秒間練り混ぜた。練上がり直後に、JIS R 5201 に準じてフロー試験を実施した。

2. 5 結果と考察

図 2 に振動時間とポーラスコンクリート空隙率との関係を示す。上面振動締固め試験の振動時間が 0~10秒間でポーラスコンクリートが急激に締め固まり、それ以上の振動を与えても緩やかな体積変化となった。40秒間の振動で目標空隙率に近い結果となった。同じ目標空隙率であっても、碎石粉の混入率が増加すると、空隙率が小さくなる傾向があった。同じ締固め時間での空隙率の差は、コンシステンシーの差と考えることができる。ただし、ペーストのフロー

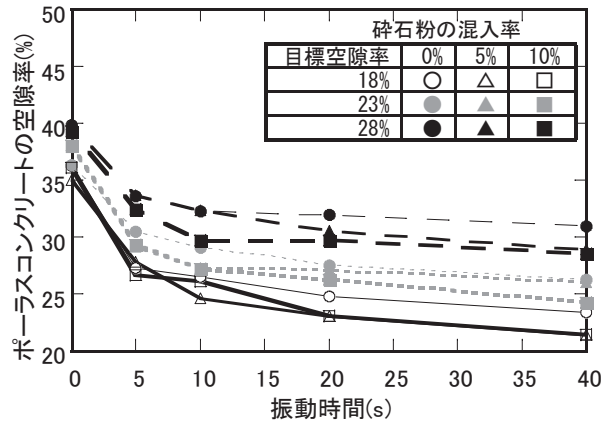


図 2 振動時間とポーラスコンクリートの空隙率との関係

表 2 配合表

碎石粉混入率 ^{*1} (%)	目標空隙率 (%)	Vp/Vg ^{*3}	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				SP (C×%)
				W	C	CSP	G	
0	18	0.413	25	106	423	0	1521	0.075
0	23	0.330	25	84	337	0	1517	0.075
0	28	0.247	25	63	252	0	1513	0.1
5	18	0.455	25	107	428	35	1476	0.15
5	23	0.372	25	87	348	29	1470	0.15
5	28	0.289	25	67	269	23	1463	0.15
10	18	0.497	25	108	433	67	1435	0.45
10	23	0.414	25	90	358	56	1426	0.45
10	28	0.332	25	71	285	44	1417	0.5

*1 ペースト体積に対する割合、*2 全配合で消泡剤 C×0.004%添加、*3 粗骨材体積(Vg)とペースト体積(Vp)の比

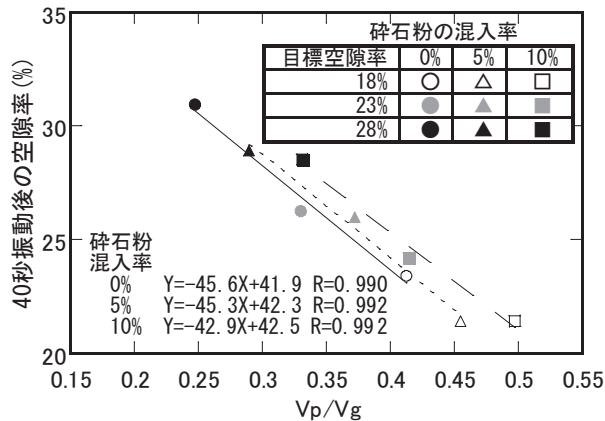


図3 V_p/V_g と40秒間振動後の空隙率との関係

値が小さくても、全ペースト量が多いと空隙を埋める余剰ペースト量が多くなり、結果的に空隙率が小さくなったと考えられる。すなわち、ペースト量を指標とした考察を行う必要があると考えられる。

そこで、図3に粗骨材体積(V_g)とペースト体積(V_p)の比 V_p/V_g と40秒間振動後の空隙率との関係を示す。砕石粉の混入率が同じペーストであれば、40秒間締め固めた後の空隙率と V_p/V_g との関係は、ほぼ直線の関係となった。ただし、同じ V_p/V_g であれば、砕石粉の混合率が高いほど、空隙率は大きくなった。すなわち、ペースト体積の一部を置換して砕石粉を混入した場合、その混入率が高いほど、ペーストの変形抵抗性が向上するため、固定ペースト体積が増加した可能性がある。

表3に砕石粉の混入率とペーストフロー値との関係を示す。ここで、混和剤の添加率は、各砕石粉混入率における3配合の平均値とした。0打フロー値の場合、101~102mm程度と差はほとんど見られない。しかし、15打フロー値の場合、砕石粉の混入率が増加するとフロー値が小さくなった。混入率0%の際に128.5mmであったフロー値が、混入率5%となると10mm低下し、混入率10%となるとさらに7mm低下した。このことから、図3で示す V_p/V_g と40秒振動後の空隙率との関係が、砕石粉混入率によって異なる程度をペーストの15打フロー値で推定できる可能性がある。

図4に40秒振動後の空隙率に対する固定ペースト体積および余剰ペースト体積との関係を示す。余剰ペーストは、その算出方法から直線上に並んだ。一方、固定ペーストは、ばらつきのために明確ではないが、ペーストのフロー値が大きいと固定ペースト体積が小さい傾向がある。また、本研究の結果では、40秒振動後の空隙率が大きいほど、固定ペースト体積が小さくなった。

以上から、ポーラスコンクリートの粗骨材に対す

表3 砕石粉の混入率とペーストフロー値

砕石粉 混入率 (%)	高性能 AE 減水剤 添加率 (%)	平均値 (mm)	
		0 打	15 打
0	0.08	102.3	128.5
5	0.15	101.5	118.0
10	0.47	101.3	111.7

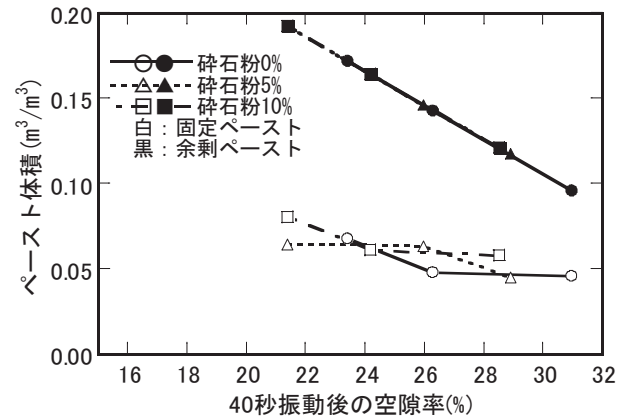


図4 40秒振動後の空隙率と各種ペースト体積との関係

るペースト体積と空隙率との関係が、砕石粉の混入率により変化することが確認された。その変化は、砕石粉の混入によるペーストの15打フローと関係があり、固定ペースト体積に影響を及ぼしている可能性が明らかとなった。

3. ペースト体積を一定とした検討

2章の結果を受けて、砕石粉の混入率を0~15%としたペースト体積を一定とし、ペーストのフレッシュ性状を混和剤添加率で調整し、同一エネルギーでポーラスコンクリートが同程度の空隙率に締め固められるようにした。

3.1 使用材料

表1に使用した材料を用いた。

3.2 配合

ペースト量を固定し、混和剤添加率を調整することで、砕石粉を添加しても締固め度が同程度となるポーラスコンクリートの配合を作成した。表4にその配合表を示す。目標空隙率は、先と同様に18、23および28%とした。砕石粉の混入率は、これまで同様、ペースト体積に対する内割置換率とした。使用施設の都合上、目標空隙率23%とした配合では、砕石粉混入率を0、5、10および15%としたが、その他の目標空隙率では混入率を0および10%のみ検討した。配合設計において、事前にペーストのみのフロー値が同程度となるように混和剤添加率を決定した。砕石粉の混入率0~10%の場合、決定した混和剤の添加率としたペースト配合で、ポーラスコンクリートを

作製した。しかし、同じフロー値のペーストでも、目標空隙率 23%、碎石粉混入率 15%とした場合には、締め固まり過ぎたため、混和剤添加率を再調整し、碎石粉混入率 0~10%の場合と同程度の締め固め性状となるようにした。

3. 3 練混ぜおよびフレッシュ性状試験

練混ぜ方法は、2.1 節(3)項に示す手順と同じとした。また、フレッシュ性状として、上面振動締め固め試験を実施した。

3. 4 ペースト性状試験

考察のため、粗骨材を除いた材料を、表 4 の配合比で混合したペーストを作製した。練混ぜ方法は、2.1 節(4)項に示す手順と同じとした。練上がり直後に、JIS R 5201 に準じてフロー試験を実施した。

3. 5 結果と考察

図 5 に振動時間とポーラスコンクリート空隙率との関係を示す。また、表 5 に、表 4 の配合で練混ぜたペーストのフロー値の結果を示す。

碎石粉 0~10%および 23csp15調整前の 15打フロー値を 129~132mm と、ほぼ同程度に調整した。その結果、目標空隙率を 23%とした場合、碎石粉の混入率 0~10%では、空隙率が 23.3~23.5%であった。しかし、混入率 15%では、空隙率が 21.6%と小さくなった。すなわち、事前に同じ 15打フロー値となることを確認し、ペースト体積を一定としても、同じエネルギーを与えた後の空隙率は同一とならなかった。

そこで、混入率 15%での混和剤添加率を 0.95%に減少させると、空隙率が 22.6%となった。このとき、ペーストの 15 打フロー値は 118mm 程度と 12mm 程度小さくなっていた。すなわち、碎石粉の混入率が高いほど、同程度の空隙率となるペーストのフロー値が小さくなった。

以降、碎石粉混入率 15%で、混和剤添加率 1.5%とした場合を 23csp15 調整前、混和剤添加率 0.95%とし

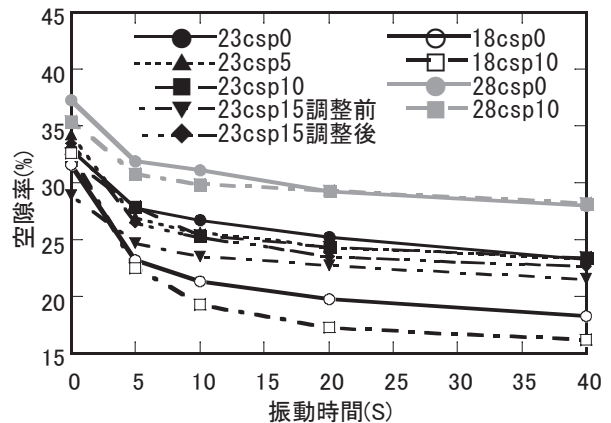


図 5 振動時間とポーラスコンクリート空隙率との関係

表 5 碎石粉の混入率とペーストフロー値

碎石粉混入率 (%)	高性能 AE 減水剤添加率 (%)	平均値 (mm)	
		0 打	15 打
0	0.015	100.5	130.5
5	0.35	99.5	128.5
10	0.9	100.0	132.0
15	1.5	100.0	132.5
15	0.95	101.0	117.5

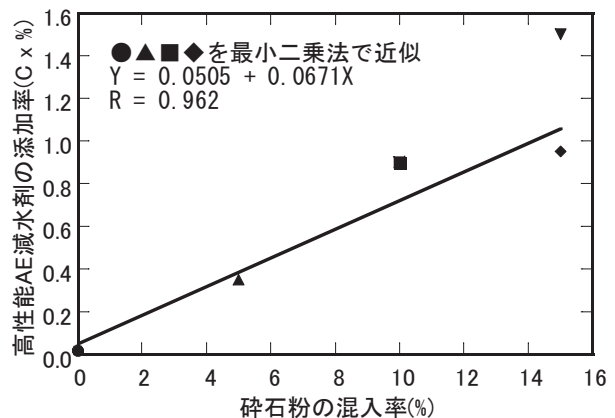


図 6 碎石粉の混入率と高性能 AE 減水剤の添加率との関係

表 4 配合表

記号	碎石粉混入率*1 (%)	目標空隙率 (%)	Vp/Vg*3	W/C (%)	単位量 (kg/m³)				SP (C×%)
					W	C	CSP	G	
23 csp 0	0	23	0.415	25	99	397	0	1426	0.015
23 csp 5	5	23	0.415	25	94	377	28	1426	0.350
23 csp 10	10	23	0.415	25	89	358	56	1426	0.900
23 csp 15 調整前	15	23	0.415	25	84	338	84	1426	1.500
23 csp 15 調整後	15	23	0.415	25	84	338	84	1426	0.950
18 csp 0	0	18	0.524	25	124	496	0	1410	0.015
18 csp 10	10	18	0.524	25	112	446	70	1410	0.950
28 csp 0	0	28	0.305	25	74	296	0	1446	0.015
28 csp 10	10	28	0.305	25	67	266	42	1446	0.950

*1 ペースト体積に対する割合、*2 全配合で消泡剤 C×0.004%添加、*3 粗骨材体積(Vg)とペースト体積(Vp)の比

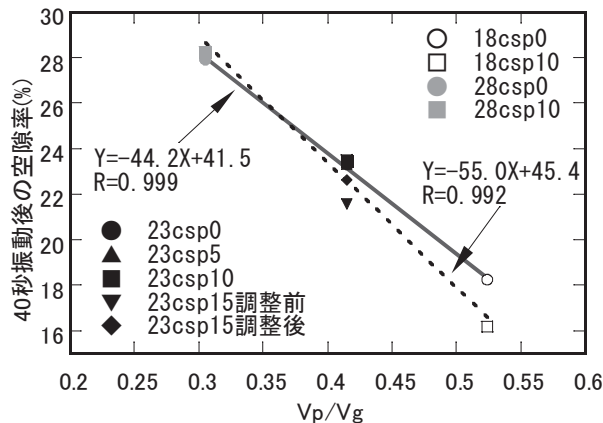


図7 V_p/V_g と 40 秒間振動後の空隙率との関係

た場合を 23csp15 調整後として示すこととした。

なお、目標空隙率を18%とした場合の実際の空隙率は16.2~18.3%、そして目標空隙率を28%とした場合の実際の空隙率は27.9~28.2%と、±1%程度の範囲に収まったが、ペースト体積が多いと空隙率のばらつきが大きくなった。

図6に碎石粉の混入率と高性能AE減水剤の添加率との関係を示す。15打フロー値が同じとなる混和剤の添加率は、碎石粉の混入率の1/10程度となり、二次関数的に増加した。

一方、すでに示したように、ポーラスコンクリートが同程度の締め固め性状を有するためには、同じ15打フローとなる(図6中の●、▲、■、▼)混和剤添加率とは異なる。同じ締め固め性状となるように調整された碎石粉混入率0(図6中の●)、5(▲)、10(■)および15%調整後(◆)の結果から、最小二乗法に近似直線を算出した。その結果、図6に示すように、混和剤の添加率は碎石粉混入率の1/15程度で直線的に変化する傾向となった。

以上の結果の要因として、小型ミキサの練混ぜ状態と、強制2軸練りミキサで粗骨材とともに混合した際のペーストの練混ぜ状態が異なっていることが考えられる。そのため、碎石粉の混入率が高くなると、粘性の増加によって練混ぜが多少不足する小型ミキサでは二次関数的に添加率が増えるが、強制2軸練りミキサでは、練混ぜ効率が変化しないため直線的な変化となったのではないかと考えられる。一方、碎石粉の添加率を高くした場合の混和剤添加率は、粒子径、粒子の混和剤吸着性、および水粉体体積比などが影響すると考えられるが、極端な品質変化がない場合には、碎石粉混入率に比例して、混和剤添加率を調整する方法が良いと考えられる。

図7に、 V_p/V_g と 40 秒間振動後の空隙率との関係を示す。23csp15 調整前などで少しばらつきはあるも

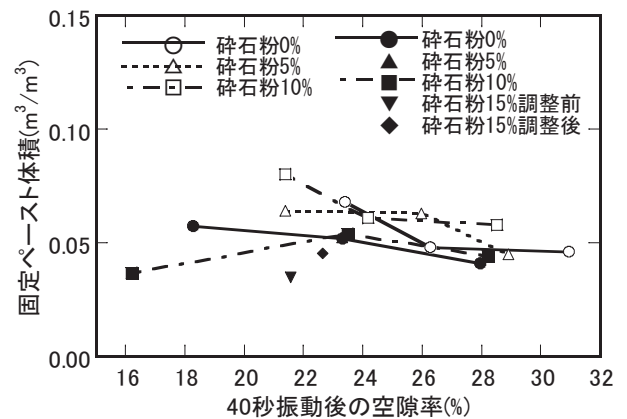


図8 40 秒振動後の空隙率と固定ペースト体積との関係

の、図3とは異なり、碎石粉の混入率による差は小さい。 V_p/V_g が3種類ある碎石粉混入率0%と10%でのプロットに関して、最小二乗法で直線近似した。碎石粉混入率が10%では、混和剤の添加率が多かったため、 V_p/V_g が多いと練混ぜ効率が良くなり、 $V_p/V_g=0.52$ での空隙率が目標空隙率より2%低下したと考えられる。そのため、碎石粉を混入率0%の場合に比べて近似直線の傾きやY切片が大きくなったと考えられる。以上から、ペースト性状を適切に調整したポーラスコンクリートの場合、ペースト量と同じとすれば、同程度に締め固められることがわかった。

図8に、40秒振動後の空隙率と固定ペースト体積との関係を示す。図内には、図4の固定ペースト体積の結果(白抜き)も示している。表4の配合で検討した結果(黒塗り)では、固定ペースト体積は、0.037~0.054程度となり、ほぼ一定と考えられる。表5では、混入率15%調整後を除くペーストの15打フロー値はほぼ等しい。そのため、図8の結果の中でも、碎石粉混入率0~15%の結果の多くは、ほぼ同じ固定ペースト体積となった。一方、碎石粉混入率10%で空隙率16%の場合や混入率15%調整前の場合では、固定ペースト体積が小さくなる傾向があった。すなわち、ペーストの変形抵抗性だけでなく、ペースト量の増加による練混ぜ効率により固定ペースト体積が異なることがわかった。

以上から、本研究で明らかとなったことは次の通りである。碎石粉を混入したポーラスコンクリートの配合設計において、碎石粉の混入率を変えても同じ空隙率を得るためには、固定ペースト体積を一定とする必要がある。そのためには、碎石粉を混入したペーストの変形抵抗性を同じとする必要がある。そのペーストの変形抵抗性は、ペーストのみを練り混ぜた際の15打フロー値で評価することができるが、

ポーラスコンクリート中のペースト体積によるミキサの練混ぜ効率や小型ミキサの性能に配慮が必要である。なお、同じ締固め性状を有するポーラスコンクリートとするためには、一般的な碎石粉の混入率と混和剤添加率との関係は比例すると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に列挙する。

- 1) 碎石粉を混入したポーラスコンクリートの配合設計において、碎石粉の混入率を変えても同じ空隙率を得るためには、固定ペースト体積を一定とすることが必要である。そのためには、碎石粉を混入したペーストの変形抵抗性を同じとすることが必要である。
- 2) ペーストの変形抵抗性は、ペーストのみを練り混ぜた際の15打フロー値で評価することができるが、ポーラスコンクリート中のペースト体積によるミキサの練混ぜ効率や小型ミキサの性能に配慮が必要である。
- 3) 同じ締固め性状を有するポーラスコンクリートとするためには、一般的な碎石粉の混入率と混和

剤添加率との関係は比例すると考えられる。

今後は、同じコンシステンシーを有するポーラスコンクリートの硬化後の強度や透水性能について検討していく予定である。

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) 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）
- 4) 麓隆行、柏木洗一：碎石粉の物理的性質が舗装用ポーラスコンクリートの性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、Vol. 32、No. 1、pp. 1391-1396（2010）

（2016年3月9日受付 2016年5月9日受理）