

論文 砕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

麓 隆行*1・柏木 洸一*2

要旨: 砕石粉は、表面が粗く、粒形も扁平であるため、セメントペーストに混合すると粘性が増加する。そこで、砕石粉を舗装用ポーラスコンクリートの増粘材として利用することを考え、砕石粉の物理的性質がポーラスコンクリートの性状に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。砕石粉の物理的性質の相互関係を考察し、ポーラスコンクリートの締固め試験、曲げ強度試験およびカンタブロ試験との関係を調べた。その結果、砕石粉の充填率、50%D および表面積比がポーラスコンクリートの締固め性状と関係しており、曲げ強度やカンタブロ損失率には全空隙率が影響することがわかった。

キーワード: ポーラスコンクリート、舗装、砕石粉、締固め、曲げ強度、カンタブロ試験

1. はじめに

コンクリート用骨材は、天然骨材から人工骨材へと移行しており、今後、砕石・砕砂と各種スラグ骨材をはじめとする副産物骨材が主流となっていくと予想される。2007年の砕石生産量は226.6百万トンとなり、そのうちコンクリート用および舗装用に使用される砕石は、約88%を占めている。特に細骨材の国内総供給量において、1995年に18.4%であった砕砂の供給量は、2006年には33.3%まで増加している¹⁾。特に近畿地方では、川砂の枯渇、海砂の採取規制および中国からの川砂の輸入禁止により、砕砂への移行が進んでいる。

砕石製造において、その生産量の約1~2%が粉体状の砕石粉として発生する²⁾。砕砂の製造量が増加すると、砕石粉の発生割合が増え、発生量も増加するため、その利用用途開発が急務となっている。

砕石粉の回収方法には、湿式と乾式がある。湿式で回収された場合、脱水ケーキ状となり、泥土としての処分を余儀なくされる。しかし、乾式で回収した場合、コンクリート用混和材や化粧品に利用することが可能である²⁾。利用用途の拡大を予想し、2009年にJIS A 5041「コンクリート用砕石粉」が制定された。

これまで、砕石粉を混和材として高流動コンクリートに適用するための研究が行われてきた²⁾。著者の既往の研究結果³⁾では、砕石粉の粒子は扁平で、表面が粗いため、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどに比べて、拘束水比が増加し、材料分離抵抗性の増加とともに流動性も大きく低下することがわかった。すなわち、流動性の高いコンクリートよりも、硬練りのコンクリートへの利用が望ましい。

舗装コンクリートは硬練りコンクリートの一つである。舗装の多くはアスファルトを使用している。しかし、

原油資源の枯渇やヒートアイランド対策などから、セメント系舗装の併用が重要となると考えられる。また、近年の舗装は、雨水の浸透・貯留、騒音低減などの目的で透水機能を持たせることが多くなっている⁴⁾。このような性能を持つコンクリートとして、粗骨材の周囲に高い粘性を持つセメントペーストをまぶしたポーラスコンクリートがある。一般にセメントペーストの増粘材に、ポリマーや特殊混和剤を用いることが多い。その増粘材として砕石粉を利用することが可能だと考えられる。

本研究では、舗装用ポーラスコンクリートの増粘材として砕石粉を用いることを目的とし、砕石粉の物理的性状がポーラスコンクリートの締固め性状、曲げ強度および骨材飛散抵抗性に及ぼす影響を調べた。

2. 砕石粉の物理的性質に関する考察

2.1 測定概要

本研究では、近畿圏内およびその周辺で採取できる表-1に示す15種類の砕石粉を対象とした。比較として石灰岩系の砕石粉を2種類用意した。石灰岩系のうち一つは、アスファルトプラントで混合時に飛散した石灰石粉を回収したものである。アスファルト混合物には利用できないため、本研究で利用を試みた。

絶乾密度、粒度(全体積の90%、50%、10%が通過する粒径を、それぞれ90%D、50%D、10%Dとする)、かさ密度、圧縮率、充填率、BET比表面積、球形比表面積、および表面積比の8種類の物理的性質を調べた。なお、砕石粉の岩種は、砕石製造工場で調査して頂いた結果である。以下にその測定の詳細を示す。

(1) 絶乾密度

絶乾密度は、JIS A 1202を参考に、80 mLピクノメーターを用いて測定した。電子レンジで30分間加熱、乾

*1 近畿大学 理工学部社会環境工学科講師 博(工) (正会員)

*2 近畿大学大学院 総合理工学研究科環境系工学専攻 (正会員)

燥させた試料を 5 g 程度計量し、水を入れたピクノメーターに投入後、2 時間湯せんを行い粒子間隙の空気を取り除き、粒子体積を測定した。

(2) 粒度および球形比表面積

粒度を、島津製作所製粒度分布測定器を用いてレーザー一回折式吸光度法により測定した。全体積の 90%, 50%, 10%が通過した粒径を 90%D, 50%D, 10%D(μm)として算出した。なお、測定は 3 回を行い、平均値を用いた。また、測定した粒度から、粒子を球形であると仮定した場合の球形比表面積 $S_c(\text{m}^2/\text{g})$ を以下の式(1)から求めた。

$$S_c = \frac{6}{\rho_p} \sum_{k=1}^n \frac{f_k}{D_{pk}} \quad (1)$$

ここで、 ρ_p : 粒子の絶乾密度(g/cm^3), f_k : 粒度での k 番目の区間の頻度, D_{pk} : その区間における平均粒径(cm), n : 粒度測定範囲の分割数である。

(3) かさ密度、圧縮率および充填率

試料を 100 mL のメモリに達するまで入れたメスシリンダーを、5 cm の高さから 200 回落下させた後の見かけの容積を読み取り、試料質量を除いて、かさ密度(g/cm^3)とした。さらに、タッピング前とタッピング後の見かけの容積の変化から圧縮率(%)を、かさ密度を砕石粉の絶乾密度で除して充填率(%)を算出した。測定は 3 回を行い、平均値を用いた。

(4) BET 比表面積

Micromeritics 社製表面積測定装置を使用し、77K の温度下で窒素ガス吸着試験を行い、多点法により BET 比表

面積を算出した。なお、前処理として、試料を 120°C で 24 時間吸引乾燥した。

(5) 表面積比

BET 比表面積を球形比表面積で除した値を、表面積比として算出した。表面積比は、球形に対して粒子表面がどの程度粗いかを表す指標と考えることができ、1 に近いほど粉体の表面がなめらかであることを示している。

2.2 測定結果と考察

各測定値の相関行列を表-2 に、粒度を図-1 に示す。

絶乾密度は、岩種にかかわらず、2.7~2.8 g/cm^3 程度であるが、一部 2.55 g/cm^3 程度となった。また、絶乾密度は他の指標と相関が小さく、独立していた。絶乾密度の差は、岩種による変化と考えられるため、絶乾密度の差を詳しく分析するためには、空隙組成、X 線回折や偏光顕微鏡等を用いた分析が必要となると考えられる。

次に、図-1 に示すように、粒度は広範囲となっている。中央粒度である 50%D の範囲が 18~60 μm と、細かい粒度は、粗い粒度の半分以下となった。硬質砂岩に着目して色分けしたが、特に特徴は見られなかった。粒度の傾きは近いことから、骨材の製造方法などにより差が生じたと考えられる。ポーラスコンクリートの性状に砕石粉の粒径が影響する場合、適切な粒度範囲に合わせるために、破碎等の処理が必要となる場合も考えられる。

かさ密度、圧縮率および充填率は、粒度と少し相関があった。圧縮率は 10%D との相関があった。小さい粒子ほど、接点が多いため圧縮されにくいことが考えられる。

表-1 砕石粉の種類とその物理的性状

記号	岩種	絶乾密度 (g/cm^3)	粒度(μm)			かさ密度 (g/cm^3)	圧縮率 (%)	充填率 (%)	BET 比表面積 (m^2/g)	球形比表面積 (m^2/g)	表面積比
			90%D	50%D	10%D						
A	流紋岩	2.69	176.0	57.1	15.8	1.63	75.1	60.5	3.48	0.084	41.3
B	流紋岩	2.69	113.4	55.3	4.9	1.70	69.1	63.1	2.76	0.227	12.2
C	石英斑岩	2.74	48.6	18.3	1.2	1.18	60.9	42.9	4.18	0.480	8.7
D	硬質砂岩	2.78	125.4	50.9	7.9	1.81	75.9	65.2	2.92	0.137	21.3
E	硬質砂岩	2.72	65.7	23.8	2.4	1.51	65.4	55.5	5.71	0.310	18.4
F	流紋岩	2.56	53.2	27.1	2.8	1.51	72.5	58.9	4.28	0.740	14.8
G	石灰岩	2.73	80.4	33.7	2.2	1.63	59.2	59.8	1.13	0.292	3.9
H*	石灰岩	2.55	86.9	27.5	1.9	1.48	66.4	58.1	4.33	0.351	12.3
I	硬質砂岩	2.76	74.2	26.6	2.6	1.49	67.5	54.2	5.76	0.276	20.9
J	硬質砂岩	2.63	72.9	30.3	4.5	1.59	68.3	60.3	5.23	0.201	26.0
K	硬質砂岩	2.75	109.2	45.8	5.6	1.70	68.4	62.0	5.43	0.160	34.0
L	硬質砂岩	2.81	64.4	28.9	4.1	1.33	68.2	47.5	5.77	0.196	29.4
M	硬質砂岩	2.77	81.6	26.2	4.9	1.41	66.6	50.9	5.76	0.190	30.3
N	硬質砂岩	2.80	63.0	30.4	2.7	1.62	66.9	57.9	5.20	0.251	20.7
O	硬質砂岩	2.65	79.8	32.3	4.9	1.56	64.9	58.8	4.82	0.196	24.6

*H は、アスファルトプラントで混合時に飛散した石灰石粉をミキサ内から電気集塵機で回収したものである。

充填率では、50%D との相関係数が 0.712 となった。充填率は、骨材での実積率と同じく、粒形や粒度の違いによる詰まりやすさの評価値であると考えられる。すなわち、単純に粒径によって、充填率が変化することはない。むしろ、粒度の広がりや形状の影響が大きいと考えられ

る。一方、粒径が小さくなると、後の表面積比からわかるように、粒形が見かけ上、なめらかになる傾向にある。したがって、相関係数は高いものの、充填率と 50%D は独立変数と考えてもよいと判断した。

BET 比表面積は、粒度や粒形とは関係なく、独立していることがわかる。この BET 比表面積は窒素分子を用いた表面積の計測により、表面の小さな凹凸を含めた表面積を評価できると考えられる。そのため、いずれの指標とも異なる性質を表すことができることがわかる。

BET 比表面積と球形比表面積との比である表面積比は、岩種に関係なく、8.7~41.3 間で幅広い値を示している。一般にも使用される石灰岩の粉末が 3.9 と小さいことから、砕石粉は比較的表面が粗いことがわかる。しかし、10%D と相関があることから、細かく破碎するなどの処理により、見かけ上、形状や表面がなめらかな傾向がみられた。

以上から、絶乾密度、BET 比表面積、圧縮率など独立している指標を除き、互いの指標は、その測定内容の関

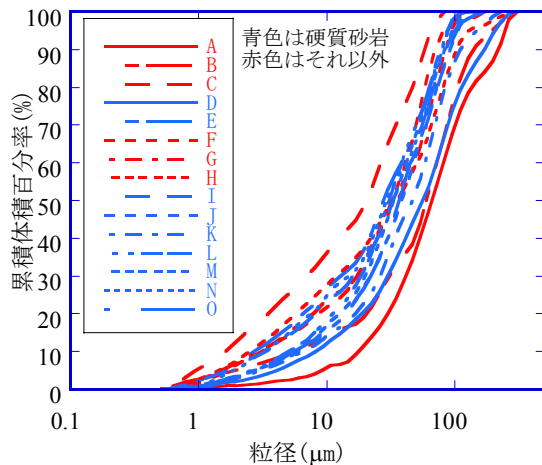


図-1 砕石粉の粒度

表-2 砕石粉の物理的性質に関する相関行列

	絶乾密度	90%D	50%D	10%D	かさ密度	圧縮率	充填率	BET 比表面積	球形比表面積	表面積比
絶乾密度	1.000	—	—	—	—	—	—	—	—	—
90%D	0.032	1.000	—	—	—	—	—	—	—	—
50%D	0.080	0.899	1.000	—	—	—	—	—	—	—
10%D	0.067	0.903	0.769	1.000	—	—	—	—	—	—
かさ密度	-0.011	0.607	0.766	0.429	1.000	—	—	—	—	—
圧縮率	-0.092	0.604	0.619	0.691	0.489	1.000	—	—	—	—
充填率	-0.295	0.573	0.712	0.394	0.959	0.495	1.000	—	—	—
BET 比表面積	0.135	-0.382	-0.482	-0.190	-0.411	0.036	-0.429	1.000	—	—
球形比表面積	-0.202	-0.701	-0.714	-0.776	-0.642	-0.677	-0.561	-0.019	1.000	—
表面積比	0.229	0.517	0.368	0.719	0.159	0.560	0.091	0.490	-0.780	1.000

注) 色つきは、相関係数 0.7 以上を示す。

表-3 砕石粉の種類とその物理的性状

砕石粉の記号	W/C (%)	目標全空隙率 (%)	p/a (%)	単位量(kg/m ³)				SP (C×%)
				水	セメント	砕石粉	粗骨材	
A	25.5	20	45	99	389	66.8	1434	2.5
B	25.5	20	45	99	389	66.8	1434	2.5
C	25.5	20	45	99	389	68.0	1434	2.5
D	25.5	20	45	99	389	69.0	1434	2.5
E	25.5	20	45	99	389	67.5	1434	2.5
F	25.5	20	45	99	389	63.6	1434	2.5
G	25.5	20	45	99	389	67.8	1434	2.5
H	25.5	20	45	99	389	63.3	1434	2.5

*p/a とは、粗骨材に対するペーストの体積割合のことである。

係でいくらかの相関があることがわかった。それらの関係を踏まえて、代表的な絶乾密度、50%D、圧縮率、充填率、BET比表面積、および表面積比に着目して、砕石粉を用いたポーラスコンクリートの性状の変化を考察することとした。

3. 砕石粉を用いたポーラスコンクリートの性状に関する考察

3.1 実験概要

(1) 使用材料、練混ぜ手順および供試体作製方法

2章に示した15種類の砕石粉のうち、記号A~Hの8種類を使用した。他に、早強ポルトランドセメント(密度 = 3.13 g/cm³, ブレーン値 = 4550 cm²/g, 50%D = 13.3 μm), 道路用6号砕石(流紋岩, 表乾密度 = 2.60 g/cm³, 実積率 = 58.3%)を使用した。また、混和剤にはポリカルボン酸系高性能AE減水剤を使用した。

砕石粉以外の影響を小さくするため、W/C = 25.5%, p/a = 45%, 混和剤の添加量をC × 2.5%とし、砕石粉の種類に関係なく、砕石粉の混合体積を一定とした目標全空隙率20%の表-3に示す配合を用いた。なお、砕石粉の混合量は、セメントペースト全体積の10%としたため、粗骨材質量の4.4 ~ 4.8%の混入量となった。

容量60Lの二軸強制練りミキサを用いて、1バッチの練混ぜ容量を43Lとして練混ぜを行なった。練混ぜは、粗骨材、セメント、砕石粉の順にミキサに入れ30秒練混ぜた後、水と高性能AE減水剤を入れ90秒練り混ぜる手順で行った。

(2) 締固め試験

転圧コンクリート舗装などの超硬練りコンクリートのコンシステンシーと締固め率を評価・測定する試験として、VC振動締固め試験がある。しかし、舗装用ポーラスコンクリートの締固め性状を評価する試験は確立されていない。ポーラスコンクリート舗装では、転圧を行わず、アスファルトフィニッシャーで上面から締固めを行なう施工が一般的である。そのため、VC振動締固め試験の5秒での締固め性状を施工での締固め性状の評価として代用している場合もある。しかし、転圧を前提としているVC振動締固め試験では、試料全体に振動エネルギーを与えていることから、実際の施工より過剰なエネルギーが与えられているため、アスファルトフィニッシャーのように直径240mmの容器に詰めた7.25kg試料の上面から20kgの重さの振動機で40秒振動を与える上面振動締固め試験を著者らは提案している⁵⁾。本研究でも上面振動締固め試験を用いることとした。上面振動締固め試験から算出した締固め密度と配合表から求めた空隙がない場合の理想密度との関係から全空隙率を求めた。なお、既往研究⁵⁾にて1バッチで上面振動

締固め試験を2度行った結果、全空隙率の差が0.2%であったことから、ばらつきは小さいと考え、上面振動締固め試験を1配合、1回の測定とした。

(3) 硬化後の注水試験、曲げ強度試験およびカンタブロ試験

測定された締固め密度と供試体体積から算出した質量の試料を型枠内に振動機を用いて詰め込み、100 × 100 × 400 mmの角柱供試体を5本、φ100 × 200 mmの円柱供試体を2本、φ100 × 100 mmの円柱供試体を3本作製した。φ100 × 200 mmの円柱供試体を用いて、打設翌日、注水法により連続空隙率を計測し、その値と締固め試験結果から独立空隙率を算出した。また、100 × 100 × 400 mmの角柱供試体は、翌日脱型後、所定の材齢まで20℃の室内にて水中養生を行い、材齢7日で曲げ強度試験を行った。φ100 × 100 mmの円柱供試体は材齢7日まで水中養生を行った後、湿度60% 温度20℃の恒温室にて24時間静置し、材齢8日にロサンゼルス試験機を用いてカンタブロ試験を行い、舗装としての骨材飛散性に関する損失率を求めた。

3.2 実験結果と考察

(1) 締固め性状に関する考察

図-2に上面振動締固め試験での振動時間と、締固め密度から算出した全空隙率との関係を示す。突き固めた状態で全空隙率は34.3~37.3%と、用いた砕石粉の違いで全空隙率の差が約3%であった。最初の10秒の振動により全空隙率がいずれの砕石粉を用いた場合も約10%低下した。その後も漸減し、40秒後には、全空隙率が22.8~24.5%と、振動によって、全空隙率の差は1.7%に縮まった。この差は、ばらつきよりも大きいと考えられ、砕石粉の種類による影響と考えた。

そこで、砕石粉の物理的性質が、40秒締固めた後の全空隙率に及ぼす影響を調べた。その手法として、40秒締

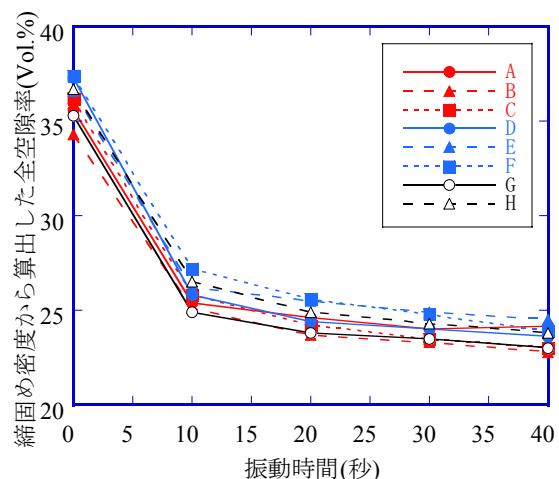


図-2 上面振動締固め試験の振動時間と全空隙率との関係

表-4 目的変数を全空隙率，説明変数を充填率，50%D，表面積比とした重回帰分析結果

変数名	範囲	偏回帰係数	標準偏回帰係数	単回帰の検定	標準誤差	単相関	偏相関	VIF	決定係数	分散分析でのF検定
充填率	42.9-65.2	0.065	0.719	1%有意	0.014	0.108	0.920	2.353	0.960	1%有意
50%D	18.3-57.1	-0.052	-1.303	1%有意	0.007	-0.087	-0.965	3.204		
表面積比	3.9-41.3	0.064	1.184	1%有意	0.007	0.649	0.978	1.582		
定数項	—	20.670	—	1%有意	0.658	—	—	—		

なお，全空隙率の範囲は，22.8-24.5 (%)である。

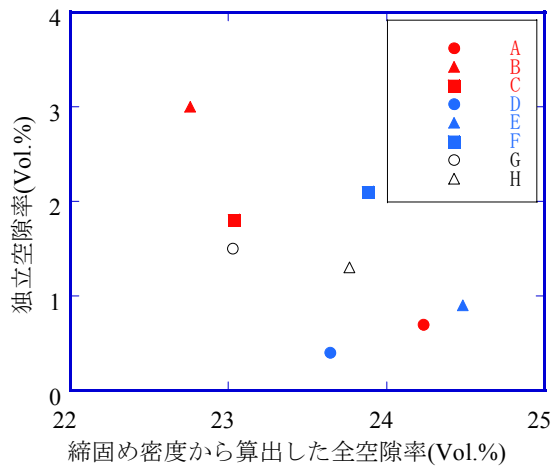


図-3 全空隙率と独立空隙率との関係

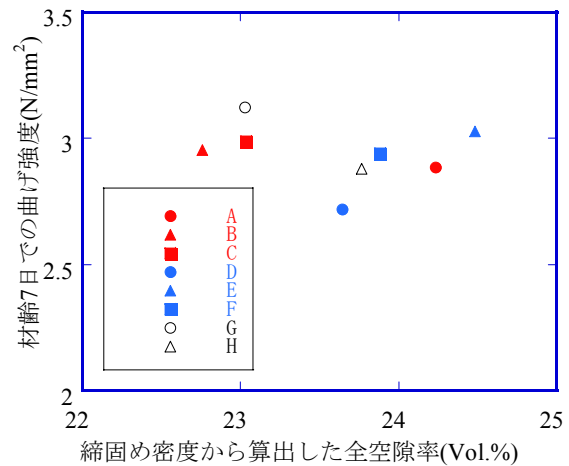


図-4 全空隙率と材齢7日での曲げ強度との関係

固めた後の全空隙率を目的変数とし，説明変数として2章で選定した砕石粉の物理的性質の組み合わせを変えて重回帰分析を行った。その結果，表-4に示すように，充填率，50%Dおよび表面積比を説明変数とした場合に，0.960と高い決定係数が得られた。先に述べたように，50%Dと充填率とは見かけ上相関があったが，重回帰分析結果のVIFからも多重共線性は小さいと考えられる。また，分散分析の結果からも，この仮定の有意性が確かめられた。

充填率は，著者の既往の研究結果³⁾から，微粉末の拘束水比と相関があることがわかっている。また，早強セメントの50%Dは13.3 μmであった。このため，本実験の範囲で，砕石粉の50%Dが大きいと，その間に早強セメント粒子が収まりやすくなり，拘束水の低減やベアリング効果によって流動性が増加したと考えられる。また，表面積比は，拘束水膜や高性能AE減水剤の吸着に影響すると考えられる³⁾。全空隙率には，振動下でのペーストの流動性が影響する。ペーストの流動性は，セメント粒子，砕石粉粒子，高性能AE減水剤，水の物理的な関係から決定されるため，砕石粉の粒径や表面性状が自由水量や有効な混和剤量に影響し，全空隙率の差が現れたと考えられる。

なお，標準偏回帰係数は，50%Dの値が大きく，表面

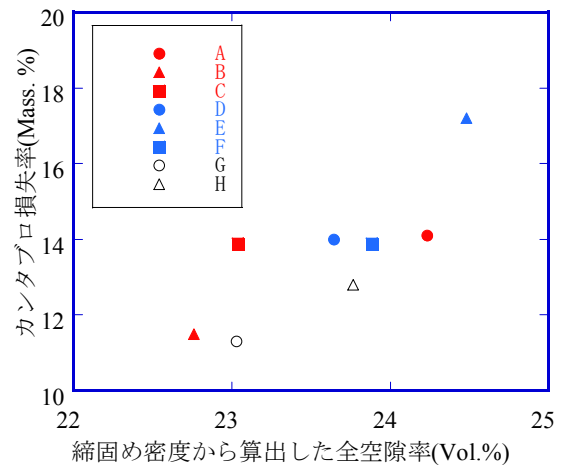


図-5 全空隙率と材齢7日でのカンタプロ損失率との関係

積比の絶対値もほぼ同程度となり，充填率の値に比べて全空隙率への影響が2倍程度大きいことがわかる。したがって，砕石粉を用いる場合に，特に50%Dと表面積比に注意することが望ましいと推測できる。

次に，図-3に全空隙率と注水試験から算出した独立空隙率との関係を示す。ばらつきはあるが，全空隙率が小さいほど，独立空隙が大きくなる傾向が見られた。独立空隙量は，3%までとそれほど大きくはない。本実験での全空隙率の低下は，ペーストの流動性が高まったため

と考えられ、単位水量や混和剤添加量の低減により調整が可能であると考えられる。

以上より、同配合で、早強セメントを使用したポーラスコンクリートの締固め性状に有効な砕石粉の物理的性質として、早強セメントよりも50%Dが大きく、充填率も大きく、また表面積比が小さいことが挙げられる。

(2) 曲げ強度試験およびカンタプロ試験に関する考察

図-4に全空隙率と曲げ強度との関係を示す。全体的に全空隙率の増加とともに曲げ強度が小さくなる傾向があるが、他の砕石粉に比べ、砕石粉Dでは10%程度曲げ強度が低下した。これは、使用した砕石粉の鉱物組成や物理的特性などの影響も考えられ、今後その原因を調べる必要がある。また、本研究の配合で材齢7日では、車道用コンクリートに必要な曲げ強度4.5 N/mm²を満足していなかったが、配合調整や養生日数により基準を満足できると考えられる。

一方、図-5にカンタプロ試験結果を示す。全空隙率が小さくなると、カンタプロ損失率も小さくなることがわかる。いずれもカンタプロ損失率は20%を下回っており、一般的なポーラスアスファルト混合物と同程度の性能を持っていると考えられる^{6),7)}。

一般的にも、本研究の結果でも、曲げ強度や骨材飛散抵抗性には、ポーラスコンクリートの全空隙率の影響が大きい。全空隙率は、締固め性状に影響されることから、3.2節(1)の結果に基づき、配合を検討すればよい。ただし、砕石粉の物性が曲げ強度に影響も考えられることから、今後、検討が必要である。

4. 結論

15種類の砕石粉の物理的性質に関する考察と、そのうち8種類の砕石粉を用いた舗装用ポーラスコンクリートのフレッシュおよび硬化後の試験から以下のことがわかった。

- (1) 砕石粉の物理的性質を調べ、その関係から、有効な物理的性質として、絶乾密度、50%D、圧縮率、充填率、BET比表面積、および表面積比を選定した。
- (2) 同配合で、早強セメントを使用したポーラスコンクリートの締固め性状に有効な砕石粉の物理的性質と

して、早強セメントよりも50%Dが大きく、充填率も大きく、また表面積比が小さいことが挙げられる。

- (3) 砕石粉を用いたポーラスコンクリートの曲げ強度には、全空隙率が影響する。ただし、砕石粉の種類が曲げ強度に影響を及ぼす可能性も見られたことから、今後、検討が必要である。
- (4) 全空隙率の増加に比例して、砕石粉を用いたポーラスコンクリートのカンタプロ損失率は低下する。

謝辞

本研究は、新都市社会技術融合創造研究会の舗装用骨材資源の有効利用に関する研究プロジェクト（リーダー大阪市立大学名誉教授 山田優）の一環であり、同メンバー各位ならびに砕石粉提供各社に感謝します。

参考文献

- 1) 宮村康夫：骨材需給の予測等について、平成20年度版砕石ビジョン、pp.33-38、2009
- 2) CSFC研究会：砕石粉使用高流動コンクリートの技術の現状および調査・施工ガイドライン(案)、CSFC研究会報告書、pp.1-7、1997
- 3) 福山知広、麓隆行、石野梨紗、山田優：砕石粉の高流動コンクリート用混和材としての利用に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol. 25, No. 1, pp. 977-982, 2003
- 4) 鎌田修、久保和幸：「特定都市河川浸水被害対策法」と「道路路面雨水処理マニュアル(案)」について、舗装、Vol. 41, No. 2, pp. 8-12, 2006
- 5) 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, 2008
- 6) 野田悦郎：ポーラスコンクリート舗装の現状と課題、ポーラスコンクリートの製造とこれからがわかる本、セメントジャーナル社、pp. 50-58, 2001
- 7) 加形護、児玉孝喜、鶴田健、君島健之：環境に優しいポーラスコンクリート舗装=ハイペック舗装=、コンクリートテクノ、Vol. 20, No. 8, pp. 49-56, 2001