

論文 砕石粉の比表面積および混入率が

コンクリートの諸特性に及ぼす影響^{※) ※※)}

Influence of crushed stone powder with different specific surface areas on properties of concrete

松家 武樹^{※※※)}
Takeju Matsuka

横山 瑞海^{※※※※)}
Minami Yokoyama

鈴木 麻里子^{※※※※※)}
Mariko Suzuki

松下 晴彦^{※※※※※※)}
Haruhiko Matsushita

要旨

コンクリート用骨材として用いられる砕石および砕砂の製造には、乾式と湿式の2種類の製造方法がある。近年では生産効率等の観点から乾式の製造方法が採用されているが、その製造方法では大量の砕石粉が副産される。2009年にはコンクリート用砕石粉が規格化されたものの、その利用法は必ずしも確立されていない。天然資源である砕石粉の廃棄は、サステイナビリティの観点から十分な対策ではなく、砕石粉の更なる有効な利用法を考えていかなければならない。コンクリートに砕石粉を利用する場合、2つのJISが関係する。一つはJIS A 5041コンクリート用砕石粉であり、他の一つはJIS A 5005コンクリート用砕石及び砕砂である。これらの規格では150 μ mふるい残分や75 μ m以下の微粒分量等を規定しているが、砕石粉の比表面積については言及していない。そこで本研究では、砕石粉の比表面積および混入率がコンクリートの諸特性に及ぼす影響について明らかにすることとした。その結果、砕石粉の比表面積はコンクリートの諸特性を評価する際の一つの指標として有効であることが明らかとなった。

キーワード

砕石粉、比表面積、コンクリート、フレッシュ性状、硬化特性

1. はじめに

コンクリート構造物の建設では、基本資材としてコンクリートが用いられる。骨材はコンクリート容積の

約7割を占めるため、その量は膨大となる。平成27年度の骨材の供給量は3億8300万トンであり、その内、コンクリート用骨材は69%程度を占めている¹⁾。供給される骨材には、河川砂利、山砂利、陸砂利、海砂利および

※) 2019年12月20日受付 2020年2月21日受理

※※) 砕石フォーラム2019第46回全国砕石技術大会(札幌)10月16日にて講演

※※※) 学術会員 熊本高等専門学校 拠点化プロジェクト系先端研究コアグループ 准教授 博士(工学)

※※※※) 熊本高等専門学校 建築社会デザイン工学科

※※※※※) 神戸大学大学院 農学研究科 助教 博士(農学)

※※※※※※) 法人正会員 中央砕石株式会社 部長代理

碎石があるが、そのほとんどを「碎石」が占めており、その割合は70%を上回る。今後、更なる天然材の採取規制および副産物の活用を踏まえても、コンクリート用骨材は「碎石・砕砂」に依存せざるを得ない状況である。

一方、コンクリート用細骨材として砕砂を製造する場合、岩石を細かく砕いて製造されるが、その製造方法は2つある。一つは乾式製造であり、他の一つは湿式製造である。乾式製造では粒径が0.15mm以下の碎石粉を多く含有する特徴がある。湿式製造では碎石粉や粘土分を除去することができるが、洗浄によって発生する汚泥水や脱水ケーキの処理が必要となる。近年では生産効率、廃棄物処理の容易さの観点から乾式製造が採用される傾向にあるが^{2), 3)}、乾式製造で排出される碎石粉の有効活用を考慮しておかなければ、天然資源の一部が廃棄され、サステイナビリティの観点からも十分な対策とは言えない。現在、全国の碎石粉の発生量は年間1200万トンと推定されている⁴⁾。2009年には「コンクリート用碎石粉」が規格化されているが、その利用法は必ずしも確立されておらず、碎石粉の更なる有効な利用法を考慮していかなければならない。

コンクリートに碎石粉を利用する場合、2つのJISが関係する。一つはJIS A 5041コンクリート用碎石粉であり、他の一つはJIS A 5005コンクリート用碎石及び砕砂である。これらの規格では150 μ mふるい残分や75 μ m以下の微粒分量等を規定しているが、碎石粉の比表面積については言及していない。一般に碎石粉に類似した粉体の品質では、比表面積が一つの指標となっている。例えば、コンクリート用混和材として用いられるフライアッシュ、高炉スラグ微粉末およびシリカフューム等が挙げられる。仮に、碎石粉の比表面積がコンクリートの性能に影響を及ぼすことが明らかになれば、比表面積に応じた等級をJIS A 5041で定め、その等級に適したコンクリートへの適用範囲をJIS A 5005で設定する必要があると考えられる。なお、著者らはこれまで碎石粉の比表面積および混入率がモルタルのフレッシュ性状に影響することを明らかとしてきた⁵⁾。しかし、コンクリートのフレッシュ性状および硬化特性に及ぼす碎石粉の比表面積および混入率の影響については明らかにしていない。

そこで本研究では、碎石粉の比表面積および混入率がコンクリートのフレッシュ性状および硬化特性に及ぼす影響について検討した。

2. 碎石粉および砕砂

本研究で扱う碎石粉は、乾式砕砂を製造する工程で発生した碎石粉を回収および分級したものである。詳述すると、乾式砕砂製造工程時に集塵機およびエアークラスフィカシオン機で回収した比表面積7120 cm^2/cm^3 の碎石粉（以下、Type Aと略記）と、その碎石粉（Type A）をサイクロンにより粗粉側および微粉側に分級させた比表面積6460 cm^2/cm^3 の碎石粉（以下、Type Bと略記）および比表面積22337 cm^2/cm^3 の碎石粉（以下、Type Cと略記）である。図1に碎石粉およびセメントの各粒子径の通過百分率の積算値を示す。本結果よりType Cの粒子径はType A、Type Bおよびセメントに比して小さいことがわかる。なお、本研究における碎石粉の比表面積および粒子径の測定はレーザー回折/散乱式粒子径分布測定装置⁶⁾を用いて行った。

粒子径に着目してJIS規格の内容をみると、JIS A 5041では150 μ mふるい残分が5%以下とされており、碎石粉の粒子径は基本的に150 μ m以下であるといえる。一方、JIS A 5005に定められる微粒分量の定義は75 μ m以下の粒子径である。本研究では前記図1の結果を基に、碎石粉の75 μ mおよび150 μ m以下の通過百分率の積算値を整理した。表1に75 μ mおよび150 μ m以下の通過百分率の積算値を示す。本研究で扱う碎石粉は、ほぼ全量が150 μ m以下の粒子径ではあるが、75 μ m以下の粒子径の割合とは必ずしも一致しない。このため本論文

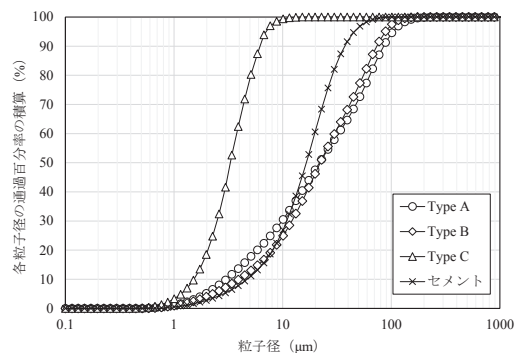


図1 粒子径と通過百分率の積算

表1 75 μmおよび150 μm以下の通過百分率積算値

種類	粒子径 (μm)	積算 (%)
Type A (碎石粉)	75以下	85.9
	150以下	99.1
Type B (碎石粉)	75以下	90.5
	150以下	99.8
Type C (碎石粉)	75以下	100
	150以下	100
セメント	75以下	99.5
	150以下	100

ではJIS A 5005で示される75 μm以下の微粒分量と、JIS A 5041で示される150 μm以下の碎石粉量を区別した上で議論することとした。これ以降、本論文では75 μm以下の碎石粉と150 μm以下の碎石粉と明記する。

図2には、レーザー回折/散乱式粒子径分布測定装置を用いて測定した碎石粉およびセメントの比表面積と算出平均径の関係を示す。セメントの比表面積はType AおよびType Bの碎石粉と同程度であるが、算術平均径は小さい値となっている。一方、本研究ではコンクリート用細骨材として2種類の砕砂をベースとしている。一つは水洗い工程を含まず製造された乾式砕砂(以下、DSと略記)であり、他の一つは水洗い工程を通して製造された湿式砕砂(以下、WSと略記)である。図3にDSおよびWSの外観を示す。DS表面には碎石粉が付着しているが、WS表面に付着している碎石粉の量は少ない。

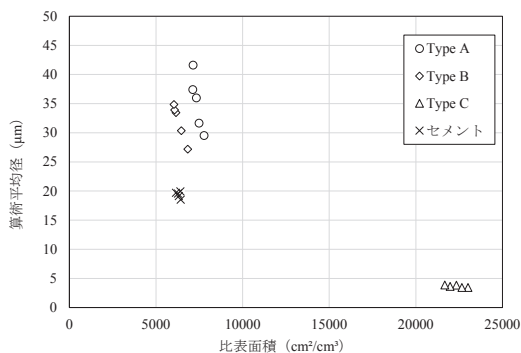
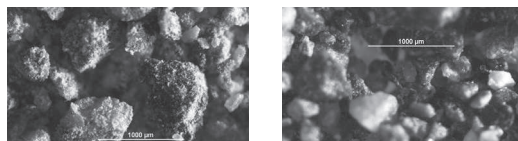


図2 碎石粉およびセメントの比表面積と算術平均径



a) 乾式砕砂 (DS) b) 湿式砕砂 (WS)

図3 砕砂の外観図

3. 実験概要

3.1 使用材料

表2に本実験で使用した材料の種類および品質を示す。細骨材には、通常の工程で製造される乾式砕砂(DS)および湿式砕砂(WS)を用いた。さらに、本実験ではDSおよびWSの砕砂に含まれる150 μm以下の碎石粉を水洗いにより除去した乾式砕砂(以下、DS150と略記)および湿式砕砂(以下、WS150と略記)を試験的に製造し用いた。図4に砕砂の粒度分布を示す。なお、本研究ではWSに碎石粉Type Bを事前に混合させた砕砂(以下、PreWSと略記)も製造し使用した。

本研究では砕砂に含まれる75 μm以下および150 μm以下の碎石粉量を明らかにするために、骨材の微粒分量試験(JIS A 1103)の試験方法に準じてそれぞれの量を測定している。なお、本研究では粗骨材に含まれる75 μm以下の碎石粉量も測定したが、少量である。

表2 材料の種類および品質

材料	種類	記号	品質
水	上水道水	W	密度:1.00g/cm ³
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度:3.16g/cm ³ 、比表面積:3330cm ² /g (6315cm ² /cm ³) 算術平均径:19.4μm
細骨材	乾式砕砂	DS	表乾密度:2.62g/cm ³ 、絶対密度:2.57g/cm ³ 吸水率:1.80%、粗粒率:2.85、 150 μm以下碎石粉率:8.0%、75 μm以下碎石粉率:4.0% 粒径判定実積率:57.5%、実積率:64.4%
	湿式砕砂	WS	表乾密度:2.65g/cm ³ 、絶対密度:2.60g/cm ³ 吸水率:1.76%、粗粒率:2.84、 150 μm以下碎石粉率:7.8%、75 μm以下碎石粉率:2.3% 粒径判定実積率:57.6%、実積率:65.8%
	乾式砕砂	DS150	表乾密度:2.66g/cm ³ 、絶対密度:2.62g/cm ³ 吸水率:1.48%、粗粒率:2.97、 150 μm以下碎石粉率:0%、75 μm以下碎石粉率:0% 粒径判定実積率:57.5%、実積率:61.8%
	湿式砕砂	WS150	表乾密度:2.66g/cm ³ 、絶対密度:2.62g/cm ³ 吸水率:1.42%、粗粒率:2.99、 150 μm以下碎石粉率:0%、75 μm以下碎石粉率:0% 粒径判定実積率:57.6%、実積率:63.4%
	湿式砕砂	PreWS	表乾密度:2.63g/cm ³ 、絶対密度:2.60g/cm ³ 吸水率:1.79%、粗粒率:2.80、 150 μm以下碎石粉率:9.1%、75 μm以下碎石粉率:5.0% 実積率:67.1%
	碎石粉	Type A Type B Type C	Type A: 絶対密度:2.684g/cm ³ 、比表面積:7120cm ² /cm ³ 算術平均径:35.2μm、岩種:砂岩 Type B: 絶対密度:2.682g/cm ³ 、比表面積:6460cm ² /cm ³ 算術平均径:31.9μm、岩種:砂岩 Type C: 絶対密度:2.687g/cm ³ 、比表面積:22337cm ² /cm ³ 算術平均径:3.6μm、岩種:砂岩
粗骨材	碎石	G1	最大寸法:20mm、表乾密度:2.70g/cm ³ 吸水率:0.47%、粗粒率:7.08、75 μm以下碎石粉率:0.2%
	碎石	G2	最大寸法:15mm、表乾密度:2.69g/cm ³ 吸水率:0.76%、粗粒率:6.35、75 μm以下碎石粉率:0.1%
混和剤	AE減水剤	-	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸-アクリル重合体の複合体
	AE剤	-	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

(176)

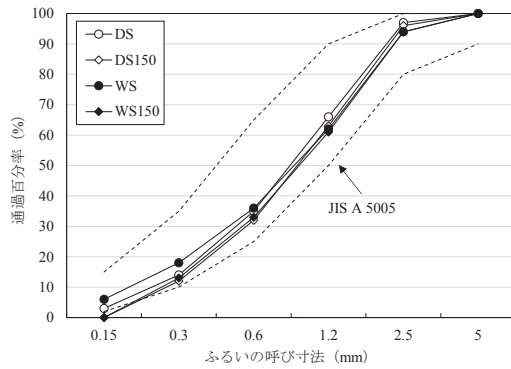


図4 砕砂の粒度分布

このため粗骨材に含まれる砕石粉は、後述する砕石粉の混入率および比表面積から除外している。

3.2 コンクリートの製造、配合および試験項目

コンクリートの製造は、容量60リットルの強制二軸ミキサーを用いて、1バッチの練混ぜ量を40リットルとして行った。練混ぜは、最初にセメント、砕石粉、細骨材および粗骨材を15秒間空練りし、次に水と混和剤を加えて90秒間行った。

コンクリートの配合は水セメント比（以下、W/Cと略記）を60%、粗骨材のかさ容積を $0.63\text{m}^3/\text{m}^3$ の一定とし、AE減水剤の量をセメントに対して1.2%を乗じる量の一定とした。配合は所定のフレッシュ性状が得られるように単位水量およびAE剤の添加量を調整して決定した。本実験では目標スランブを $12.0+2.0\text{cm}$ から $12.0-1.0\text{cm}$ の範囲とし、目標空気量を $4.5\pm 1.0\%$ とした。表3にコンクリートの配合を示す。本実験においてType BおよびType Cの砕石粉は絶乾状態で用いている。

図5には各配合における単位水量の結果を示す。同図には細骨材量に対する $75\mu\text{m}$ 以下および $150\mu\text{m}$ 以下の砕石粉の混入率を示している。この算定方法を詳述すると、各配合における表乾状態の砕砂の質量から吸水率分の水分量を差分し、その値に前記表2に示す砕砂に含まれる砕石粉率を乗じ、コンクリート製造時に添加した絶乾状態の砕石粉量を加算して、絶乾状態の砕砂および砕石粉の量で除すことで求めている。要約すると、ここに示す値は絶乾状態の細骨材量に対する砕石粉量の割合を示していることとなる。

フレッシュコンクリートでは、スランブ試験（JIS A

表3 コンクリートの配合

No.	W/C	単位量 (kg/m ³)											AE減水剤						
		細骨材		単位量 (kg/m ³)											AE減水剤 C-%	AE剤 C-%			
		W	C	DS150	WS150	DS	WS	PtsWS	Type B	Type C	G1 (2010)	G2 (1505)							
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%		
1	46.3	162	270	872	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	410	613	1.2	0
2	46.3	162	270	-	872	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
3	46.0	165	275	-	-	846	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10
4	45.6	168	280	-	-	-	844	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10
5	46.0	165	275	-	-	-	-	850	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05
6	46.0	165	275	-	-	-	830	-	26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15
7	45.4	170	283	-	-	-	777	-	-	51	-	-	-	-	-	-	-	-	0.35
8	46.0	165	275	-	-	-	805	-	52	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.25
9	45.6	168	280	-	-	-	-	787	51	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.35
10	45.0	173	288	-	-	-	766	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-	-	0.35
11	45.4	170	283	-	-	-	786	-	-	-	51	-	-	-	-	-	-	-	0.35
12	44.0	180	300	-	-	-	668	-	-	-	118	-	-	-	-	-	-	-	0.50

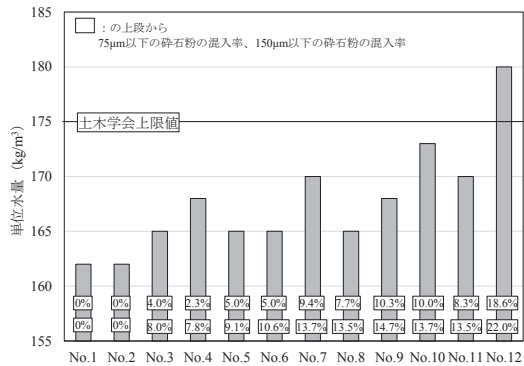


図5 単位水量

1101)、空気量試験（JIS A 1128）およびブリーディング試験（JIS A 1123）を行った。硬化コンクリートでは、圧縮強度試験（JIS A 1108）、割裂引張強度試験（JIS A 1113）および静弾性係数試験（JIS A 1149）を行った。

4. 実験結果および考察

4.1 フレッシュコンクリート

図6に、 $75\mu\text{m}$ および $150\mu\text{m}$ 以下の砕石粉の混入率と単位水量の関係を示す。本結果より、砕石粉の混入率と単位水量には相関関係があることがわかる。同図には土木学会標準示方書に示されるコンクリートの単位水量の上限値も示す。JIS A 5005では砕砂に含まれる微粒分量の最大値は9.0%とされているが、本実験結果では単位水量上限値における $75\mu\text{m}$ 以下の砕石粉の混入率は15.0%となる。コンクリートの単位水量の観点から論じれば、JIS A 5005に定められている砕砂の微粒分量の最大9.0%の値は緩和できることが示唆されているものの、今後、砕石粉を用いたコンクリートの収縮特性や耐久性を含めた総合的な評価が必要である。

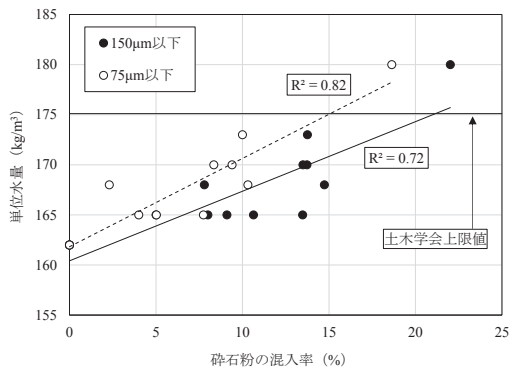


図6 碎石粉の混入率と単位水量の関係

本論文では、碎石粉の比表面積の違いがコンクリートの流動性に及ぼす影響を明らかにするために、各配合に含まれる碎石粉の総表面積を算出し、碎石粉の総表面積と単位水量の関係について整理した。なお、碎砂に含まれる150µm以下の碎石粉は、碎石粉を分級する以前に採取された碎石粉Aであると仮定して碎石粉の総表面積を算出している。図7に碎石粉の総表面積と単位水量の関係を示す。なお、同図には75µm以下の結果を示していない。これは75µm以下を対象にした碎石粉Aの比表面積が明らかでないためである。本結果は碎石粉の総表面積の増加とともにコンクリートの単位水量は増加し、前記図6の結果に比して、決定係数は高い値となっている。この結果から碎石粉の比表面積はコンクリートの単位水量に影響を及ぼす要因の一つであり、コンクリートの流動性を評価する際の一つの指標として有効であるといえる。

図8に75µmおよび150µm以下の碎石粉の混入率とブリーディング量の結果を示す。ブリーディング量は

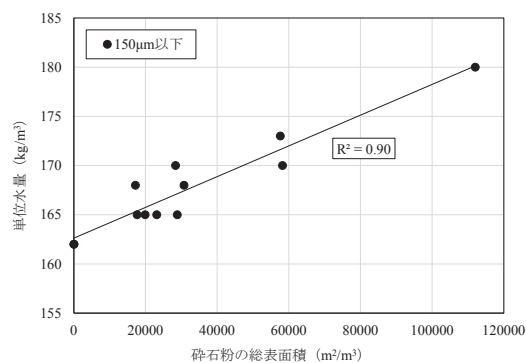


図7 碎石粉の総表面積と単位水量の関係

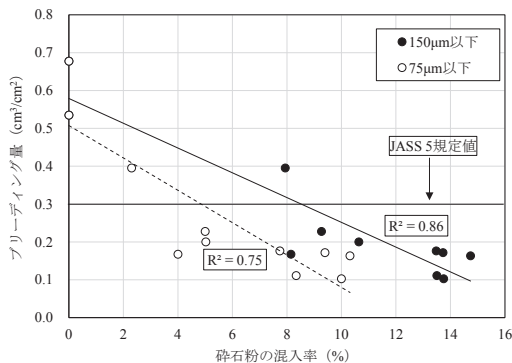


図8 ブリーディング量

コンクリートの水密性を確保する観点から、0.3 cm³/cm²以下とする規定がJASS 5⁷⁾ で定められている。本実験結果では75µm以下の碎石粉が5%混入した場合にブリーディング量が0.3 cm³/cm²となっている。この結果を踏まえると、ブリーディング抑制には適切な量の碎石粉が必要であるといえる。

4.2 硬化コンクリート

図9に75µmおよび150µm以下の碎石粉の混入率とコンクリートの圧縮強度の関係を示す。本実験結果では、碎石粉の混入率が大きくなるとコンクリートの圧縮強度が低下する傾向にある。75µm以下の碎石粉の混入率が5%および15%における材齢28日におけるコンクリートの圧縮強度は、碎石粉無混入と比較して、それぞれ平均3.8%および11.4%低下している。

図10にはコンクリートの圧縮強度と割裂引張強度の関係を示す。同図には土木学会コンクリート標準示方書⁸⁾ に示される式（以下、示方書式と略記）より算出

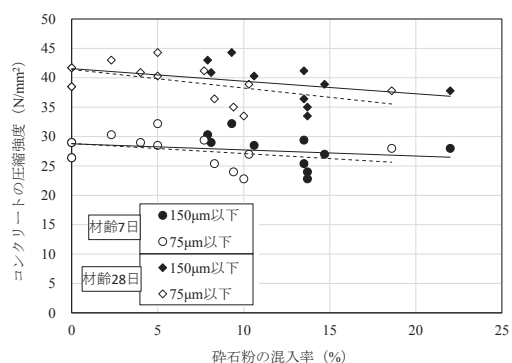


図9 碎石粉の混入率と圧縮強度の関係

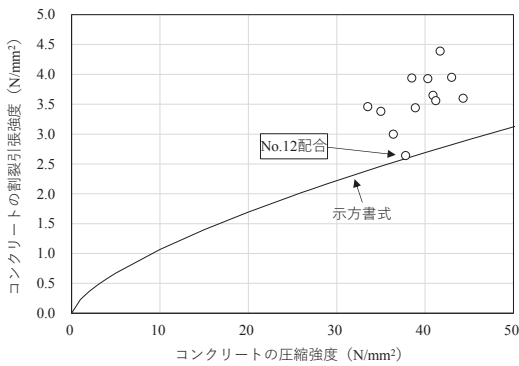


図10 圧縮強度と割裂引張強度の関係

した値も示す。本実験で得られた割裂引張強度は示方書式で得られる値より大きな値となっている。なお、碎石粉の混入率が高いNo.12の配合は他の配合に比して割裂引張強度は小さい値となっているものの示方書式より大きい値である。

図11にはコンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。同図には示方書式⁸⁾より算出した値も示している。本実験で得られた静弾性係数の値は、概ね示方書式により算出した値より大きな結果となっており、安全側である。

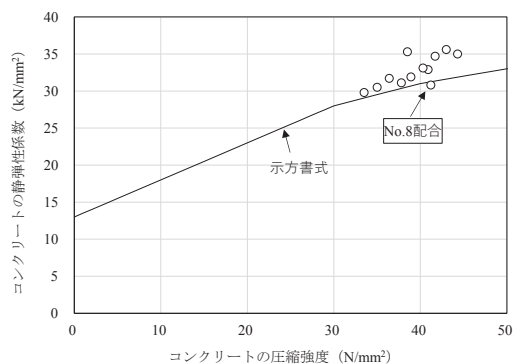


図11 圧縮強度と静弾性係数の関係

5. まとめ

本研究の成果をまとめると以下の通りである。

- (1) 碎石粉の比表面積はコンクリートの流動性を評価する際の一つの指標として有効である。
- (2) 碎石粉の混入率および総表面積の増加はコンクリートの単位水量を増大させるが、ブリーディング抑

制の観点から適切な量の碎石粉は必要である。

- (3) 碎石粉の混入率の増加はコンクリートの圧縮強度を低下させる傾向にある。75 μm 以下の碎石粉の混入率が5%および15%の場合、材齢28日におけるコンクリートの圧縮強度は碎石粉無混入と比較して、それぞれ平均3.8%および11.4%低下する。
- (4) 碎石粉を用いたコンクリートの割裂引張強度および弾性係数は、示方書式から算出される値より安全側である。
- (5) 現行のJIS A 5005では砕砂の微粒分量の最大値は一律9%と定められているが、碎石粉の比表面積を限定することで、その上限値を緩和できる可能性が示唆された。今後、耐久性を含めたデータを蓄積し、碎石粉の比表面積に応じた等級を定め、その等級に適した微粒分量の上限値の再設定が必要である。

謝辞

本研究は、一般社団法人日本碎石協会研究の助成(研究代表者:松家武樹)により行った。また、本実験は株式会社ワールドの協力を得て行った。ここに深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) 一般社団法人日本碎石協会: 骨材供給構造の推移, 2015.
- 2) 真野孝次, 辻幸和, 友澤史紀, 深松孝: 碎石粉を使用した碎石・砕砂コンクリートの性状, コンクリート工学, Vol.46, No.11, pp.18-24, 2008.
- 3) 藤本郷史, 橋本勝由, 賀谷隆人, 長原雄一: 乾式砕砂製造プロセスにおける複数回の破碎が骨材とコンクリートの各種物性へ与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011.
- 4) 辻幸和, 真野孝次, 友澤史紀, 山本和成: コンクリート用碎石粉の品質の実態に関する調査研究, コンクリート工学, Vol.48, No.3, pp.15-22, 2010.
- 5) 鈴木麻里子, 松家武樹, 横山瑞海, 松下晴彦: 比表面積の異なる碎石粉が砕砂モルタルの流動性に及ぼす影響, 農業農村工学会論文集, No.309 (87-2), pp.I_143-I_148, 2019.

- 6) レーザー回折／散乱式粒子径分布測定装置LA-920による微量資料の測定、HORIBA Technical Reports、No.20、pp.39-43、2000.
- 7) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説JASS 5 鉄筋コンクリート工事、2009.
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕、2017.