

# 論文 破碎したホタテ貝殻と砕石を用いたポーラスコンクリートの骨材充填係数および圧縮強度について

岡田 雄樹\*1・菅田 紀之\*2

**要旨:** 破碎したホタテ貝殻と砕石を用いたポーラスコンクリートの配合設計における粗骨材絶対容積を計算するための骨材充填係数を算定するために、ホタテ貝殻と砕石を混合した骨材の実積率試験および混合骨材を用いたポーラスコンクリートの空隙率試験を行った。その結果、貝殻が多いほど混合骨材の実積率が小さくなること、貝殻の混合割合が同程度以上の場合に空隙率の増加に従い骨材充填係数が小さくなることを明らかにした。また、算定した骨材充填係数を用いて製造したポーラスコンクリートの圧縮強度試験結果から、ホタテ貝殻の混合により圧縮強度が小さくなることを明らかにした。

**キーワード:** ポーラスコンクリート, ホタテ貝殻, 空隙, 骨材充填係数, 圧縮強度

## 1. はじめに

コンクリート分野における地球環境問題への対応の一つとして環境負荷低減・生物共生型のエココンクリートが注目されている。その一つであるポーラスコンクリートは排水性や透水性等に優れており、それらの機能を生かし道路や河川構造物に使用されることが多くなってきている。また、廃棄物の低減が環境問題のテーマになっており、本研究で注目しているホタテ貝殻は産業廃棄物の一つであり低減が求められている。ホタテ貝は、年間に全国で約 40 万トン水揚げされており、ホタテ貝は殻つきのまま商品化されることもあるが、ほとんどは貝殻を取り除き商品化されている。これに伴い年間 20 万トン程度のホタテ貝殻が排出され、有効利用されない約半数の貝殻は野積み放置されるなど問題化している。この解決のためにはホタテ貝殻の新たなリサイクル方法を確立する必要があり、ホタテ貝殻のコンクリートへの適用についていくつか検討が行われている<sup>1)2)3)4)</sup>。著者らもホタテ貝殻を骨材として用いたポーラスコンクリートに関する研究を行ってきた<sup>5)6)7)8)9)</sup>。粗骨材として破碎したホタテ貝殻と砕石を用いたポーラスコンクリートに関する検討<sup>9)</sup>では、配合計算における粗骨材の絶対容積を[骨材の実積率]×[骨材充填係数]として求めた。この骨材充填係数とは、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研究委員会報告書<sup>10)</sup>の配(調)合において補正係数として示されているものであり、本論文では骨材充填係数と呼ぶこととする。骨材充填係数は 0.9 ~ 0.95 程度であることが多いため、文献 8) では 0.9 を採用して目標空隙率を得るための配合を決定し検討を行った。その結果、目標空隙率と実測空隙率の差および大小関係が、ホタテ貝殻と砕石の混合割合によって異なることが明らかとなった。そのことより、

文献 9) ではホタテ貝殻と砕石を用いたポーラスコンクリートの骨材充填係数の算定を行った。

本論文では文献 9) とは異なる粒度のホタテ貝殻と砕石を用い、シリーズ 1 としてホタテ貝殻と砕石の割合を変えたポーラスコンクリートにおいて目標空隙率を 10 ~ 25% に設定し、その空隙率試験の結果から骨材充填係数を算定し、空隙率と骨材充填係数の関係を検討する。シリーズ 2 では算定した骨材充填係数を用いて目標空隙率 20% の配合を計算し、その配合のポーラスコンクリートを製造し、空隙率試験および圧縮強度試験を行い、圧縮強度に及ぼすホタテ貝殻の影響について検討する。

## 2. 実験の概要

### 2.1 使用材料および配合

ポーラスコンクリートの製造に使用した材料を表 1 に示す。セメント (C) として普通ポルトランドセメント、粗骨材として砕石 1305 (CS, JISA 5001 の S-13 (6 号)) およびホタテ貝殻 (SS) を用いた。ホタテ貝殻は砕いたもので、図 1 に示すように粒径は 1.2 ~ 10 mm 程度であ

表 1 使用材料

使用材料	性質等
セメント (C)	普通ポルトランドセメント 密度 : 3.16 g/cm <sup>3</sup>
砕石 (CS)	JISA 5005 砕石 1305 表乾密度 : 2.70 g/cm <sup>3</sup>
ホタテ貝殻 (SS)	粒径 : 1.2 ~ 10 mm 表乾密度 : 2.61 g/cm <sup>3</sup>
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系

\*1 室蘭工業大学 大学院工学研究科環境創生工学系専攻 (学生会員)

\*2 室蘭工業大学 大学院工学研究科くらし環境系領域准教授 博 (工) (正会員)

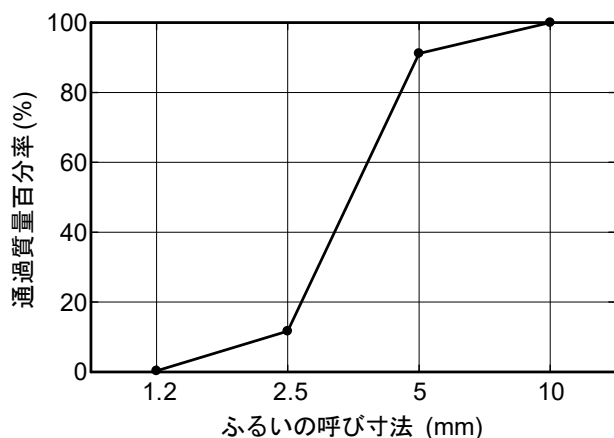


図-1 ホタテ貝殻の粒度分布



写真-1 ホタテ貝殻

表-2 配合：シリーズ1

配合名	SS/G (%)	W/C (%)	目標空隙率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	SS	CS	SP
SS0	0	25	10	130	520	0	1601	1.30
			15	109	436			1.09
			20	87.7	351			0.88
			25	66.5	266			0.67
SS25	25	25	10	139	554	384	1152	1.39
			15	117	469			1.17
			20	96.2	385			0.96
			25	75.0	300			0.75
SS50	50	25	10	152	608	720	720	1.52
			15	131	524			1.31
			20	110	439			1.10
			25	88.6	354			0.89
SS75	75	25	10	168	671	995	332	1.68
			15	147	586			1.47
			20	125	502			1.25
			25	104	417			1.04
SS100	100	25	10	184	737	1214	0	1.84
			15	163	653			1.63
			20	142	568			1.42
			25	121	483			1.21

り、細骨材に近い粒度である。また、写真-1に示すように扁平な形状をしているのが特徴である。表乾密度は使用した碎石より若干小さい。また、セメントペースト部の流動性を確保するためにポリカルボン酸系の高性能AE減水剤 (SP) を用いた。

ホタテ貝殻と碎石による混合骨材の骨材充填係数を算定するシリーズ1のポーラスコンクリートの配合を表-2に示す。水セメント比 (W/C) を25%で一定とし、混合骨材のホタテ貝殻置換率 (SS/G, G = SS + CS) を0, 25, 50, 75 および 100%の5水準とした。また、各ホタテ貝殻置換率に対して目標空隙率を10, 15, 20 および 25%の4水準とし、合計で20ケースのポーラスコンクリート

を製造した。配合における粗骨材の絶対容積は、ホタテ貝殻と碎石の混合骨材の実積率相当とした。実積率については3.1で示す。なお、セメントペーストにその容積の4%程度の気泡が含まれると仮定し単位水量およびセメント量を求めた。また、セメントペースト部の目標フロー値を160に設定し、高性能AE減水剤量を調整した。

シリーズ1において算定した骨材充填係数の適用性およびポーラスコンクリートの圧縮強度を検討するシリーズ2の配合を表-3に示す。水セメント比 (W/C) を25%で一定とし、混合骨材のホタテ貝殻置換率 (SS/G, G = SS + CS) を0, 25, 50, 75 および 100%の5ケースとした。粗骨材の絶対容積は、混合骨材の実積率にシリーズ

表-3 配合：シリーズ2

配合名	SS/G (%)	W/C (%)	目標空隙率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	SS	CS	SP
SS0	0	25	20	125	499	0	1366	1.25
SS25	25			114	457	356	1067	1.14
SS50	50			122	489	680	680	1.22
SS75	75			141	567	919	306	1.42
SS100	100			161	644	1096	0	1.61

1で得られた骨材充填係数を乗じて求めた。

## 2.2 供試体の作製方法

ポーラスコンクリートの練混ぜは次のように行った。水平二軸強制練ミキサーにホタテ貝殻と碎石の混合骨材およびセメントを投入し1分間の空練り,次に高性能AE減水剤を混和した水を投入し4分間の練混ぜである。供試体の作製は、直径100mm、高さ200mmの型枠を用い、テーブルバイブレーター(振動数1500rpm、振幅0.8mm)による振動締固めによって行った。締固めは、型枠二分の一までポーラスコンクリートを入れ10秒間の振動、型枠上縁まで入れ10秒間の振動、次に沈下部分の上縁まで入れ5秒間の振動締固めである。供試体の養生は、打込み後2日間は20℃での封かん養生、材齢2日目で脱型を行い、その後20℃での水中養生である。

## 2.3 骨材の実積率試験

本研究の配合は、骨材の実積率試験の結果に基づき決定している。ホタテ貝殻と碎石の混合骨材の実積率試験をJIS A 1104に従い行った。骨材の詰め方については棒突きおよびジグギングの二つの方法で行った。また、締固めを、テーブルバイブレーターを用いて行う方法によっても骨材の実積率を求めた。以後、JISに従い棒突きを行う方法を棒突き法、JISに従いジグギングを行う方法をジグギング法、テーブルバイブレーターを用いる方法を振動法と呼ぶこととする。JISの方法、振動法ともに実積率は2回の試験の平均値である。なお、表-2および表-3に示した配合は、ジグギング法に従い求めた実積率を用いて決定したものである。

## 2.4 ポーラスコンクリートの空隙率試験

空隙率は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研究委員会報告書<sup>10)</sup>のポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)の質量法に従い求めた。空隙率試験は直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を用いて行い、空隙率の値は3本の供試体の平均値である。

## 2.5 圧縮強度試験

ポーラスコンクリートの圧縮強度試験はJIS A 1108に従い実施した。試験には直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を用い、載荷面の処理としては、セメントペー

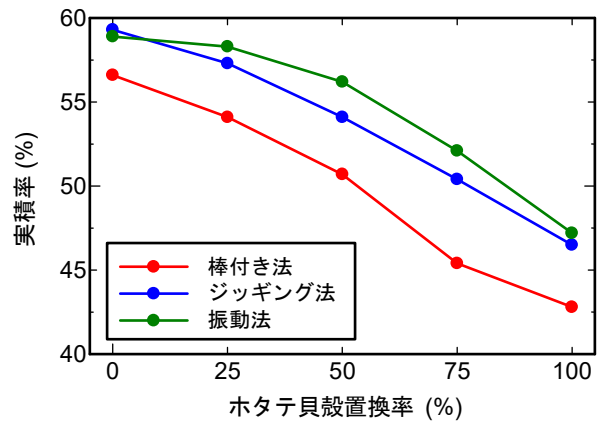


図-2 混合骨材の実積率

ストによるキャッピングを行った。圧縮強度の値は5本の供試体の平均値である。圧縮強度試験を実施した材齢は28日である。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 混合骨材の実積率

図-2にホタテ貝殻と碎石の混合骨材の実積率試験結果を示す。棒突き法、ジグギング法および振動法の結果を示している。三方法でホタテ貝殻置換率が増加するほど実積率が減少していることがわかる。ホタテ貝殻は砕いたものであるが、その形状は扁平であるため、貝殻量が増加するほど密になりにくいといえる。棒突き法とジグギング法を比較すると、ジグギング法の実積率が大きいことがわかる。その差は3~5%である。振動法による実積率は、ホタテ貝殻を混合している場合にジグギング法よりも1.2%大きく、50%置換時に差が最も大きい。また、棒突き法との差は2~7%である。ジグギング法では衝撃により、振動法では振動により骨材の移動が生じ貝殻が平行になるように重なり密に詰まったと考えられる。振動法による締め効果は、貝殻置換率50%において最も大きくなっているといえる。

### 3.2 シリーズ1の空隙率

図-3に目標空隙率と実測した全空隙率の関係を示す。目標空隙率の増加に対応して全空隙率が増加していることがわかる。また、貝殻と碎石が混合されているSS25お

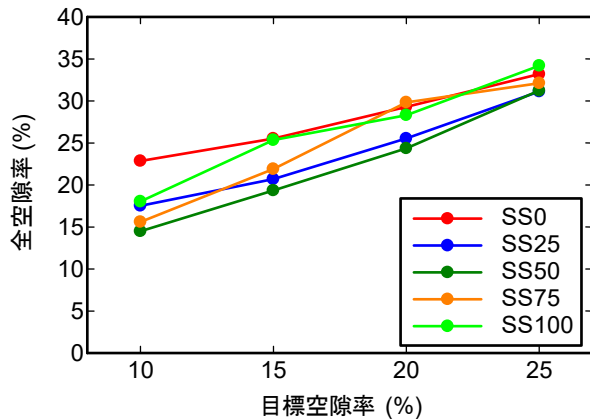


図-3 目標空隙率と全空隙率の関係

よび SS50 の全空隙率は碎石のみの SS0 より小さくなっていることがわかる。SS75 では目標空隙率 10 %, 15 % および 25 % において, SS100 では目標空隙率 10 % において全空隙率が SS0 よりも小さくなっている。図-2 の骨材の実積率で示したように貝殻を混合した場合には振動等が詰まり方に影響しやすくなり, コンクリートの練混ぜ工程およびテーブルバイブレーターによる締固め工程において, その効果が現われ空隙率が小さくなったものと考えられる。

### 3.3 骨材充填係数

骨材充填係数は, 配合において粗骨材絶対容積を [骨材の実積率] × [骨材充填係数] として求める場合の係数であり, 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研究委員会報告書<sup>10)</sup>では補正係数 ( $\alpha$ ) としているものである。骨材充填係数 ( $\alpha$ ) は次式で求めることができる。

$$\alpha = \frac{1 - A_t}{1 - A} \quad (1)$$

ここに,  $A_t$ : 実測した全空隙率  
 $A$ : 目標空隙率

図-4~8に質量法による全空隙率と骨材充填係数の関係を示す。図中の直線は最小二乗法により求めた回帰直線である。全ての貝殻置換率において骨材充填係数が1以下になっていることがわかる。充填係数が1以下になるのは, セメントペーストが骨材間に入り込むため骨材間の距離が実積率試験時よりも離れるためである。ホタテ貝殻を混合していない SS0 では全空隙率が増加するほど骨材充填係数が大きくなっているのに対して, ホタテ貝殻を混合した SS50, SS75 および SS100 において全空隙率が増加するに従い骨材充填係数が小さくなる傾向を示している。全空隙率が大きいほど骨材充填係数が大きくなる理由としては, 空隙率が大きい配合ほどセメン

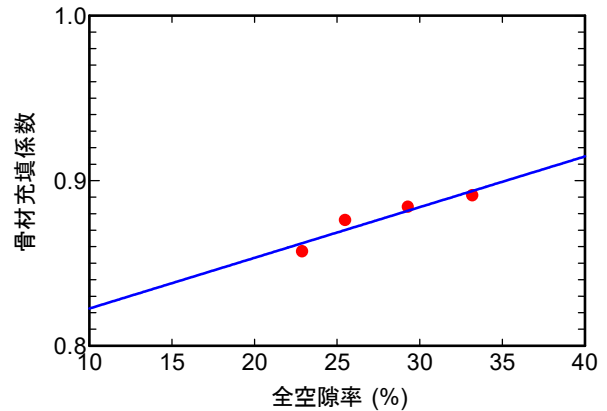


図-4 全空隙率と骨材充填係数の関係 : SS0

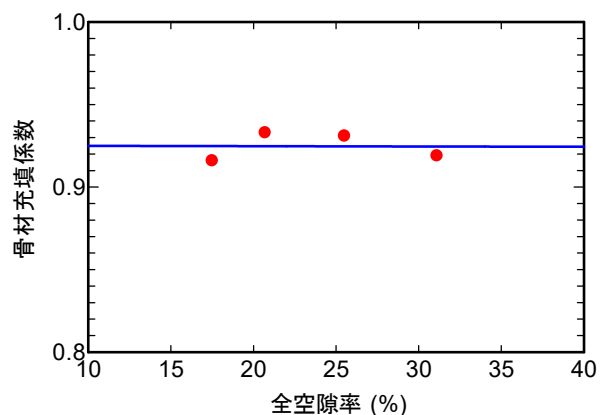


図-5 全空隙率と骨材充填係数の関係 : SS25

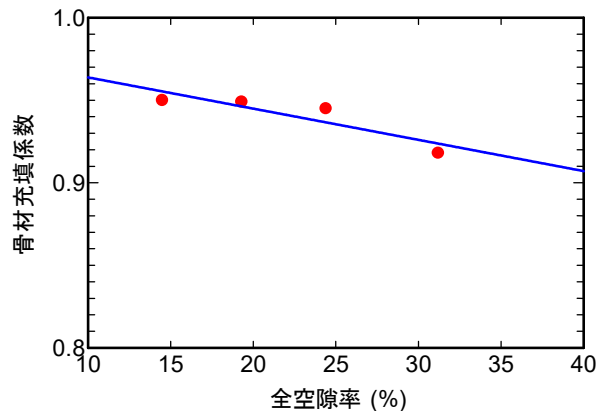


図-6 全空隙率と骨材充填係数の関係 : SS50

トペースト量が少なく, 骨材間のペースト量も少なくなり骨材の実積率試験の状態に近づいたためと考えられる。貝殻を混合した場合に異なる傾向を示す要因としては, 平行に重なる貝殻間におけるセメントペーストによる潤滑効果の減少が考えられる。

表-4に目標空隙率を15%, 20%および25%とし, 配合における粗骨材の絶対容積をジギング法による実積率を用いて計算する場合の骨材充填係数を示す。ホタテ貝殻を混合した SS25, SS50, SS75 および SS100 の骨材

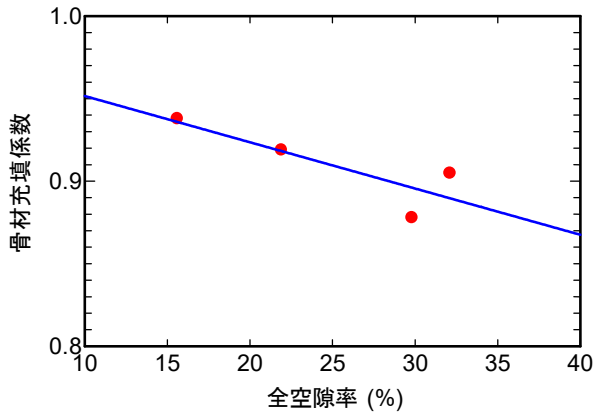


図-7 全空隙率と骨材充填係数の関係：SS75

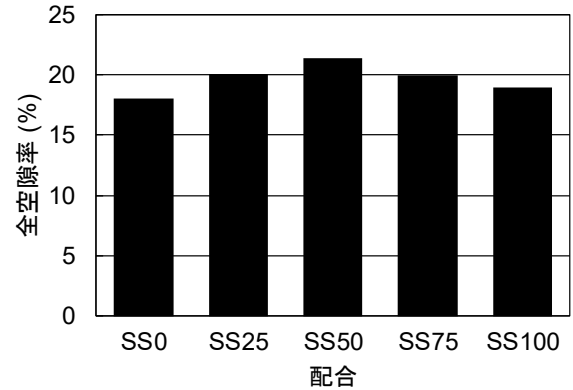


図-9 全空隙率

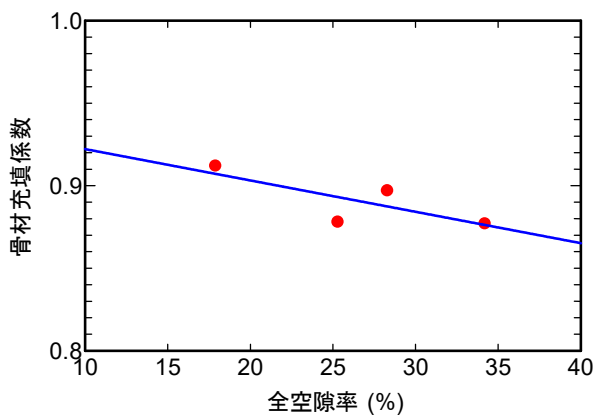


図-8 全空隙率と骨材充填係数の関係：SS100

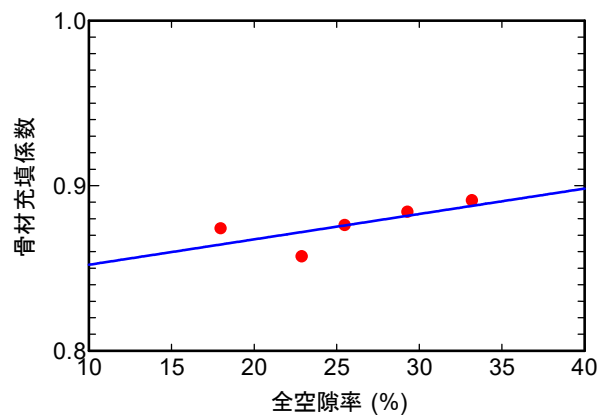


図-10 全空隙率と骨材充填係数の関係：SS0

表-4 骨材充填係数：ジグギング法

目標空隙率 (%)	ホタテ貝殻置換率 (%)				
	0	25	50	75	100
15	0.838	0.926	0.954	0.938	0.913
20	0.853	0.926	0.945	0.924	0.903
25	0.869	0.926	0.935	0.910	0.894

表-5 骨材充填係数：振動法

目標空隙率 (%)	ホタテ貝殻置換率 (%)				
	0	25	50	75	100
15	0.844	0.910	0.919	0.907	0.899
20	0.859	0.910	0.910	0.893	0.890
25	0.875	0.910	0.900	0.880	0.880

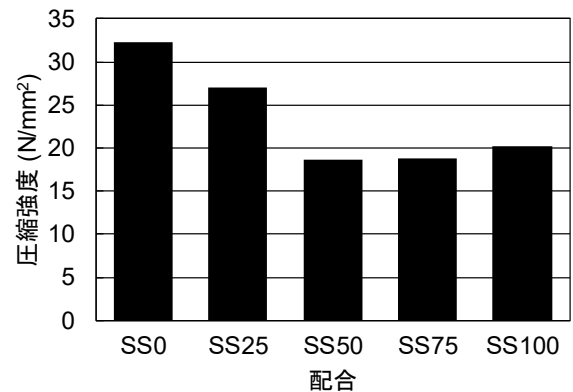


図-11 圧縮強度

で最も大きかったことを示している。配合計算における骨材の実積率として振動法による値を採用した場合に換算した骨材充填係数を示すと表-5のようになる。その値 ( $\alpha_{TV}$ ) は次式で求められる。

$$\alpha_{TV} = \frac{G_{JIS}}{G_{TV}} \alpha \quad (2)$$

ここに、 $G_{JIS}$ ：ジグギング法による実積率

$G_{TV}$ ：振動法による実積率

充填係数が SS0 よりも大きくなっていることがわかる。また、SS50 の骨材充填係数が最も大きいことがわかる。粗骨材の実積率の結果で述べたように練混ぜ工程および締固め工程における締固め効果が貝殻 50 %置換におい

$\alpha$  : ジグギング法による実積率を用いる  
場合の骨材充填係数

表より、表-4と同様にホタテ貝殻を混合した場合の骨材充填係数が、混合していないものより大きくなっている。しかしながら、貝殻を混合した場合の差は小さく、0.9程度になる。ポーラスコンクリートの締固め方法と同様な方法で締固めた骨材の実積率を採用することにより、骨材充填係数に及ぼすホタテ貝殻置換率の影響を少なくできるといえる。

### 3.4 シリーズ2の空隙率

図-9にシリーズ2のポーラスコンクリートの全空隙率を示す。本研究で算定した骨材充填係数を用いることにより、全空隙率は目標空隙率20%に近い結果が得られていることがわかる。最大の差はSS0の2.0%である。SS0の差が大きくなった要因としては、シリーズ1において実測空隙率の範囲が23%から33%であり、シリーズ2の目標空隙率から外れた結果しか得られていないことが考えられる。シリーズ2の結果を追加してSS0の全空隙率と骨材充填係数の関係を示すと図-10のようになり、目標空隙率20%における骨材充填係数は0.868であり若干大きくなる。

### 3.5 圧縮強度

図-11に圧縮強度試験の結果を示す。図よりホタテ貝殻置換率が25%(SS25)、50%(SS50)に増加すると圧縮強度が減少していることがわかる。ホタテ貝殻は表面が平滑であり、セメントペーストとの付着が砕石よりも劣ることにより、強度低下に至ったのではないかと考えられる。しかしながら、貝殻置換率75%(SS75)および100%(SS100)の圧縮強度はSS50と同程度であり、貝殻置換率が50%から増加しても強度は低下していない。

## 4. まとめ

本研究では、破碎したホタテ貝殻と砕石を用いたポーラスコンクリートの配合設計のための骨材充填係数を算定するために、ホタテ貝殻の骨材に対する置換率を0%から100%まで変えた混合骨材の実積率試験、それぞれのホタテ貝殻置換率に対して目標空隙率を10%から25%に設定したポーラスコンクリートの空隙率試験を行った。また、算定した骨材充填係数を用いて配合計算したポーラスコンクリートの圧縮強度試験を行った。その結果をまとめると次のようになる。

- 1) ホタテ貝殻置換率が増加するほど骨材の実積率は減少する。
- 2) JISのジグギング法および振動法による実積率はJISの棒付き法よりも大きくなる。
- 3) ホタテ貝殻を混合した場合、全空隙率が小さくなる

傾向を示す。

- 4) ホタテ貝殻置換率が50%以上の場合、全空隙率が大きいほど骨材充填係数は小さくなる。
- 5) 振動法による実積率を採用した場合、骨材充填係数に及ぼすホタテ貝殻置換率の影響は小さくなる。
- 6) ホタテ貝殻を混合することにより圧縮強度は小さくなる。

## 参考文献

- 1) 山内 匡, 清宮理, 横田季彦, 八木展彦: ホタテ貝殻を細骨材として活用したコンクリートの基本的性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1649-1654, 2006
- 2) 山内 匡, 清宮理, 横田季彦, 若崎正光: ホタテ貝殻を細骨材として活用したコンクリートによるケーソン根固めブロックの製作, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.487-492, 2007
- 3) 多田克彦, 福田康昭, 福田一見, 外崎 正: ホタテ貝殻を用いたコンクリートの魚礁ブロックへの適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1655-1660, 2006
- 4) 迫田恵三, 渡邊晋也: コンクリート内の貝殻の方向性がホタテ貝殻コンクリートの性質に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.59, pp.531-536, 2006
- 5) 菅田紀之, 渡邊稔明: 粉碎したホタテ貝殻を混入したポーラスコンクリートの特性について, セメント・コンクリート論文集, No.60, pp.596-602, 2007
- 6) 菅田紀之, 渡辺新一: ホタテ貝殻混入ポーラスコンクリートの諸特性について, コンクリート年次論文集, Vol.30, No.1, pp.325-330, 2008
- 7) 菅田紀之, 橋本篤志: ホタテ貝殻を粗骨材として活用したポーラスコンクリートの特性について, セメント・コンクリート論文集, No.63, pp.255-260, 2010
- 8) 坂内佳祐, 菅田紀之: 破碎したホタテ貝殻を用いたポーラスコンクリートの特性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1755-1760, 2016
- 9) 坂内佳祐, 菅田紀之: 破碎したホタテ貝殻と砕石を用いたポーラスコンクリートの配合設計のための骨材充填係数の算定について, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1495-1500, 2017
- 10) 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研究委員会: 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研究委員会 報告書, 日本コンクリート工学会, 2015