

論文 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

坂内 佳祐*1・菅田 紀之*2

要旨：ホタテ貝殻を骨材として用いたポーラスコンクリートの特性等に関する検討を行うため、ペースト部（モルタル部）のフロー試験、空隙率試験、圧縮強度試験、透水試験および保水試験を行った。水結合材比は25%、空隙率は20%に設定し、ホタテ貝殻の骨材に対する置換率を0%から100%まで変化させ貝殻置換の影響について検討した。その結果、貝殻置換率が高いほどフローが減少すること、実空隙率の増減は貝殻置換率により異なること、貝殻使用時に限ると貝殻置換率が高いほど圧縮強度が小さくなること、貝殻置換率が高いほど保水量が大きくなることなどが明らかとなった。

キーワード：ポーラスコンクリート、ホタテ貝殻、圧縮強度、空隙、透水性、保水性

1. はじめに

近年、地球環境問題の観点からコンクリート分野では、エココンクリートの研究、実用化が進められている。その中でポーラスコンクリートは緑化・水質浄化・吸音などの性質を持っており、環境問題に幅広く適用できるコンクリートとして注目されてきている。ポーラスコンクリートは、現場において生物との共生や景観向上を目的として河川や沼地、湖などで使用されているが、未解明な点が多くあり、有用性や新機能に関する多くの研究が行われてきている¹⁾。

一方、水産資源として全国で約50万トンのホタテ貝が水揚げされており、そのうちの約70%は北海道が占めている。水揚げされたホタテ貝は殻つきのまま商品化される場合もあるが、ほとんどは貝殻を取り除き商品化され、これに伴い年間に全国水揚げ量の約半数の21～25万トンのホタテ貝殻が廃棄されている。年間で廃棄される貝殻のうち約10数万トンは土壌改良材や食品添加物として有効利用が行われている。しかしながら、残りの約10数万トンについては産業廃棄物として最終処分、あるいは処分せずに野積み放置されており、処分地確保の問題や景観の問題などが生じてきているのが現状である。このような問題への対策として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^{2),3),4),5)}。また、著者らはポーラスコンクリートに用いた研究を行ってきた^{6),7),8)}。

本研究では、ホタテ貝殻の有効利用を目的として、ポーラスコンクリートへ利用することを考えた。ホタテ貝殻は骨材の代替材と考え、骨材中の使用量を0～100%に変化させた。試験内容はポーラスコンクリートの空隙率試験、圧縮強度試験、透水性試験、保水性試験の他、セメントペースト部（モルタル部）のフロー試験、混合骨材の実積率試験である。

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。結合材として普通ポルトランドセメント（C）およびシリカフューム（SF）を用いた。骨材として5号砕石（CG）およびホタテ貝殻（SS）を用いた。ホタテ貝殻は粒径を15mm以下に破碎したものであり、その粒度曲線を図-1に示す。また、セメントペースト部（モルタ

表-1 使用材料

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 ³
シリカフューム (SF)	比表面積：200,000 cm ² /g 平均粒径：0.2 μm 密度：2.2 g/cm ³
砕石 (CG)	5号砕石 表乾密度：2.67 g/cm ³ 吸水率：1.70 %
ホタテ貝殻 (SS)	粒径：15 mm 以下 表乾密度：2.61 g/cm ³ 吸水率：0.98 %
高性能 AE 減水剤 (SP)	ポリカルボン酸系

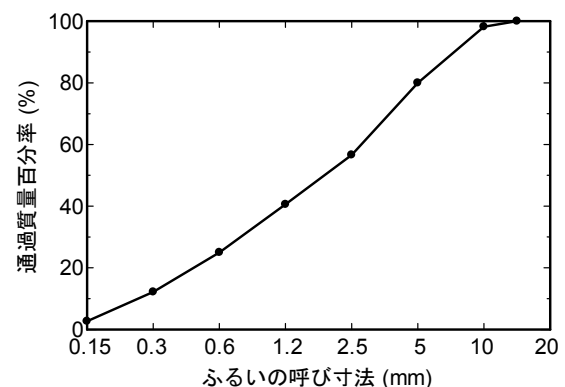


図-1 ホタテ貝殻の粒度曲線

*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）

表－2 配合

	W/B (%)	SF/B (%)	SS/G (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	SF	SS	CG	SP
SS0	25	10	0	120	432	48.0	0	1354	2.88
SS25	25	10	25	103	371	41.3	364	1091	2.89
SS50	25	10	50	98.2	398	39.3	739	739	9.43
SS75	25	10	75	110	395	43.9	1047	349	17.56
SS100	25	10	100	129	464	51.6	1266	0	20.62

$$B = C + SF \quad G = SS + CG$$

ル部)の流動性を確保するために、高性能 AE 減水剤 (SP) を用いた。

ポーラスコンクリートの配合を表－2に示す。水結合材比 (W/B, $B=C+SF$) を 25 %, シリカフェーム置換率 (SF/B) を 10%, 目標空隙率を 20 %とした。ホタテ貝殻の使用量については、骨材の置換率 (SS/G, $G=SS+CG$) を 0 %, 25 %, 50 %, 75 %および 100 %の 5 水準とした。また、セメントペースト部 (モルタル部) の目標フローは 170 として、高性能 AE 減水剤量を調整した。ただし、ホタテ貝殻置換率 75 %および 100 %では 170 に達しなかったため、目標フローを 140 とした。骨材量 ($G=SS+CG$) については、混合骨材の実積率試験結果に基づいて決定した。なお、配合を表のように SS0 から SS100 で表す。

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、水平二軸強制練ミキサーに、先ず気乾状態のホタテ貝殻、砕石、セメントおよびシリカフェームを投入し 1 分間の空練り後、水と混和剤を投入し 4 分間練混ぜた。練りあがったポーラスコンクリートを直径 100mm、高さ 200mm の円柱型枠に 3 層で詰め、テーブルバイブレーターを用いて締固めを行った。締固め時間は、実際の締固めにおいてコンクリートが締固まり、かつ著しい垂れが発生しないように、1, 2 層目では 10 秒ずつ、3 層目では 5 秒、合計 25 秒とした。最終締固め時に供試体の表面をコテでならして成型した。養生方法は、打込み後 2 日間は 20 °Cでの封かん養生、材齢 2 日目以降から 20 °Cでの水中養生である。

2.3 フロー試験

本研究では配合を決定するために、セメントペースト部あるいはモルタル部のフロー試験を JIS R 5201 に従い行った。破碎したホタテ貝殻には細粒分も含んでおり、フローへの影響も想定されたため、ホタテ貝殻を含む配合に対しては、粒径 2.5 mm 以下のホタテ貝殻を含めたモルタルについて試験を行った。

2.4 骨材の実積率試験

本研究では骨材の実積率に基づいて配合を決定するために、ホタテ貝殻と砕石の混合骨材の実積率試験を JIS A

1104 に従い行った。試験は、JIS 法である棒付き法とテーブルバイブレーターによる振動締固め法の 2 種類の方法で行った。振動締固め法における締固め時間は、規定の容器を用いた実際の締固めにおいて、上面の沈下がほぼ収まる時間として、各層 10 秒間ずつ、3 層で合計 30 秒とした。

2.5 空隙率試験

空隙率試験は、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を用いて、ポーラスコンクリートの設計・施工方法の確立に関する研究委員会による空隙率試験方法(案)⁹⁾の容積法に従い行った。なお、試験は各配合 3 本の供試体について行い。その平均を空隙率とした。

2.6 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を用いて、JIS A 1108 に従い行った。試験材齢は 28 日とし、供試体の端面処理は研磨機を用いて行い、その後、表面を硬質石膏でキャッピングし荷重を載荷した。なお、試験は各配合 5 本の供試体について行い。その平均を圧縮強度とした。

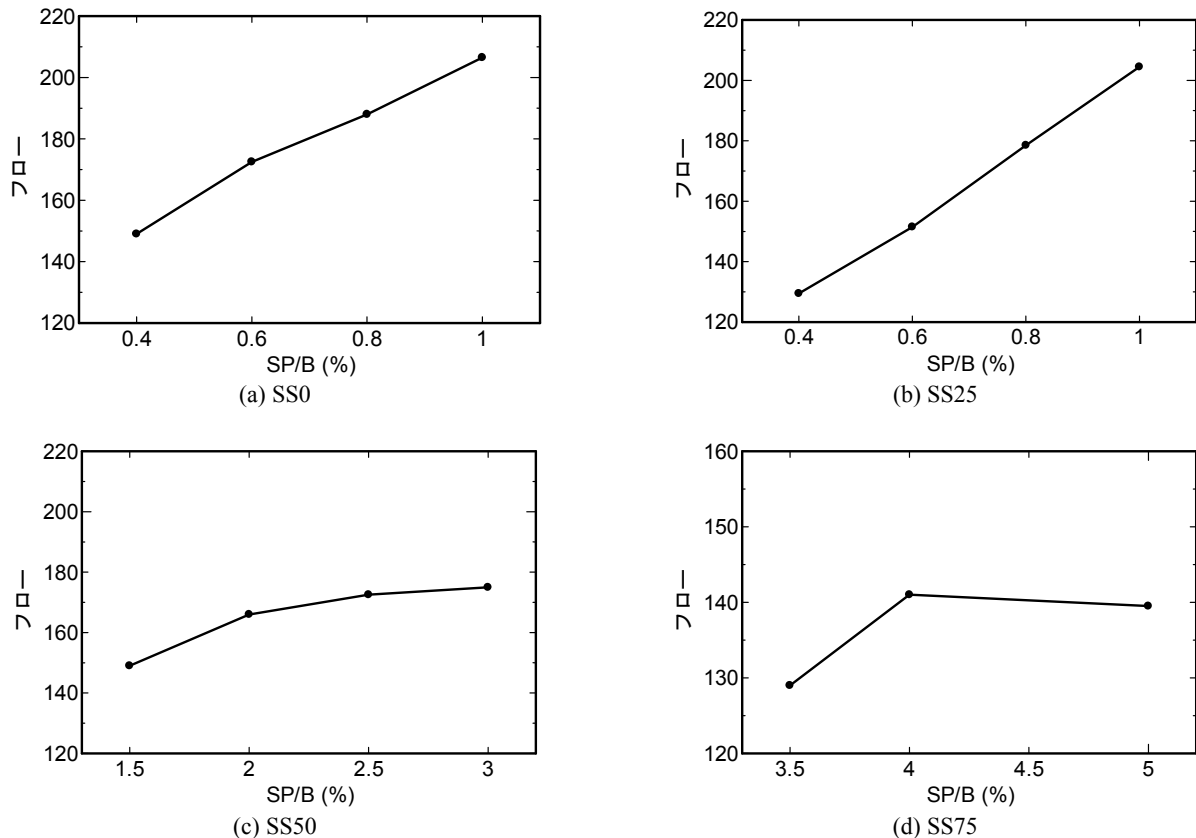
2.7 透水試験

透水試験は、直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体を用いて、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によるポーラスコンクリートの透水試験方法(案)⁹⁾に従い、定水位法により行った。なお、試験は各配合 3 本の供試体について行い。その平均を透水係数とした。

2.8 保水試験

保水試験は、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を用いて、インターロッキングブロック舗装技術協会のインターロッキング舗装設計施工要領¹⁰⁾に基づき次のように行った。

- 1) 供試体を温度 105°Cの乾燥機内で乾燥し、絶乾質量 M_d を計測
- 2) 24 時間水中で吸水後、密閉容器内で 30 分間水を切り、湿潤質量 M_w を計測
- 3) 保水量を式 (1) で計算



図－2 フロー試験結果

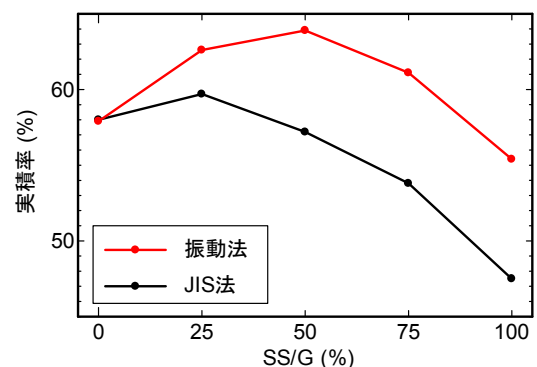
$$\text{保水量 (g/cm}^3\text{)} = (M_w - M_d) / \text{供試体体積} \quad (1)$$

なお、試験は各配合 3 本の供試体について行い、その平均を保水量とした。

3. 結果および考察

3.1 フロー試験結果

配合における高性能 AE 減水剤 (SP) 量を決定するために、各配合のセメントペースト部あるいはモルタル部のフロー試験を行った。ホタテ貝殻を含む配合に関しては、粒径 2.5 mm 以下のホタテ貝殻を含めたモルタルについて試験を行った。また、SS100 の配合についてはモルタル部の配合が SS75 とほぼ等しかったため、フロー試験を実施しなかった。図－2 にホタテ貝殻置換率ごとの SP 添加率 (SP/B) とフローの関係を示す。全体的な傾向として、SP 添加率が増加する程、フローが大きくなっているといえる。SP 添加率の増加に対するフローの増加は貝殻置換率が高くなると少なくなっている。特に、貝殻置換率 75% ではフローが 140 で上限に達した。次に、SP 添加率を一定と仮定した場合について考えると、貝殻置換率が高くなるに従い、フローが小さくなっていることがわかる。この理由としては、図－1 からわかるようにホタテ貝殻には細粒分を比較的多く含んでおり、その混合量が増えた場合、ホタテ貝殻への吸着量が増えセ



図－3 貝殻置換率と実積率の関係

メントと混合される水の量が減ったことが考えられる。セメントペースト部あるいはモルタル部の目標フローとして設定したフロー170 が得られる SP 添加率は、図よりホタテ貝殻置換率 0 % に対しては 0.6%、置換率 25 % に対しては 0.7%、置換率 50 % に対しては 2.4% と決定し、ホタテ貝殻置換率 75 % および 100 % についてはフローが最大となった 4 % とした。

3.2 骨材の実積率試験結果

配合における骨材量の決定のために、骨材の実積率試験を行った。図－3 にホタテ貝殻置換率と実積率の関係を示す。図中には突き棒を用いた JIS 法による結果、および締め固めにテーブルバイブレーターを用いた振動法による結果を示している。著者らは、ホタテ貝殻を用いた

ポーラスコンクリートの空隙率に、骨材の締めやすさが影響することを明らかにしており⁸⁾、配合の決定には振動法による実積率に基づく方が適していると考えた。JIS 法、振動法ともに貝殻 0 %で実積率は 58 %であった。JIS 法では、貝殻置換率 25 %で実積率が大きくなったが、貝殻置換率 50 %以上では実積率は小さくなった。置換率が大きいほど実積率の低下量は大きく、置換率 100 %では実積率は 47.5 %である。一方、振動法では、貝殻置換率 25 ~ 75 %で実積率が大きくなり、最大は置換率 50 %における実積率 64 %である。また、JIS と比較しても 4 ~ 8 %実積率が増加している。貝殻と碎石を混合した骨材で実積率が増加した理由としては、粒径の異なる碎石とホタテ貝殻を混ぜることで碎石間の空隙をホタテ貝殻が埋めたことが考えられる。また、振動法では碎石間の空隙を埋める働きがより顕著に作用したものと考えられる。実際の練混ぜでは振動法と同様の効果が得られるものと仮定し、振動法の実積率に基づき配合を決定した。ただし、練り上がりポーラスコンクリート中の骨材量は実積率の 9 割程度になることより、振動法による実積率の約 9 割を骨材の絶対容積として採用した。

3.3 空隙率試験結果

図-4 にホタテ貝殻置換率と空隙率の関係を示す。全空隙率については、目標空隙率 20 %に対して、ホタテ貝殻置換率 0 %, 75 %, 100 %では空隙率が大きくなった。配合における骨材の絶対容積を実積率の 90 %程度として定めたが、実際にはさらに少ない絶対容積になっていることを示している。骨材粒子間に入り込むセメントペースト(モルタル)量が想定よりも多くなることにより、骨材間の距離が離れたことが原因と考えられる。一方、ホタテ貝殻置換率 25 %および 50 %では全空隙率が目標空隙率よりも小さくなった。この理由としては、ホタテ貝殻が扁平な薄片であるため、練混ぜ作用により方向性を持ち、打込み締め作業において供試体軸方向に対して垂直な方向に平行に重なるように詰まったことと、碎石間の空隙を埋める効果がより高く現れ、締め固まりの程度が想定よりも高くなったことが考えられる。連続空隙率は、全空隙率と同様な傾向を示していることが分かる。全空隙率と連続空隙率の差である独立空隙は、ホタテ貝殻置換率が高いほど多くなる傾向を示し、貝殻置換率 0 %から順に、0.6 %, 0.5 %, 1.3 %, 1.9 %, 3.8 %である。

3.4 圧縮強度試験結果

図-5 に貝殻置換率と圧縮強度の関係を示す。ホタテ貝殻置換率 0 %の圧縮強度に対して、ホタテ貝殻置換率 25 %および 50 %では圧縮強度が大きくなった。一方、置換率 75 %および 100 %では圧縮強度が小さくなった。また、ホタテ貝殻を使用したものに注目するとホタテ貝殻置換率が高いほど、強度が小さくなっていることがわか

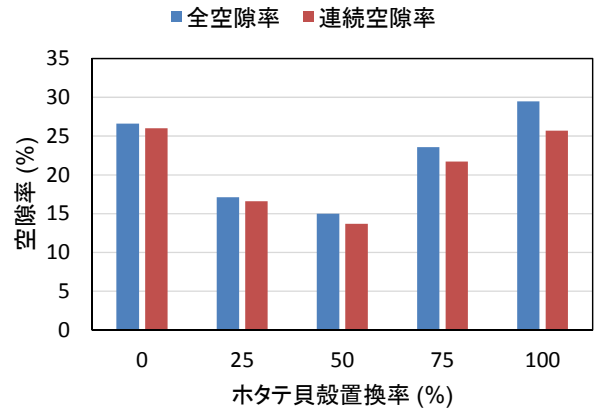


図-4 貝殻置換率と空隙率の関係

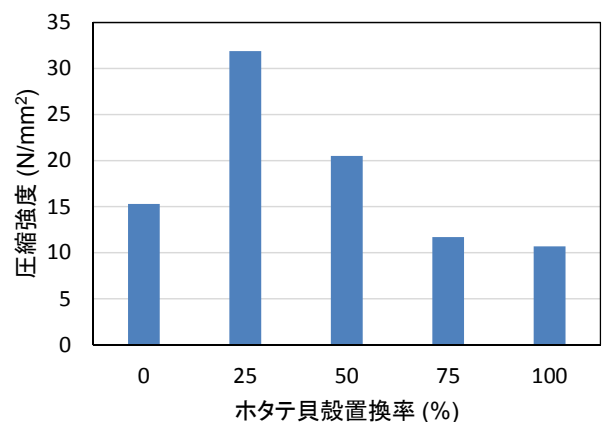


図-5 貝殻置換率と圧縮強度の関係

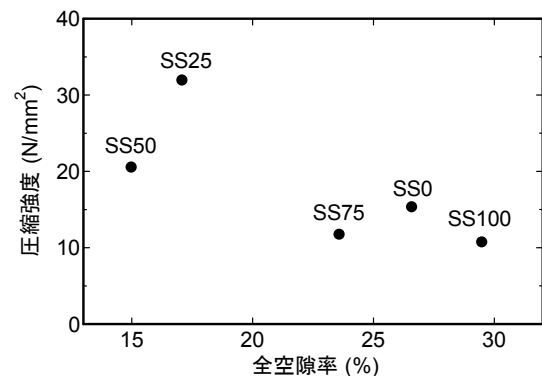
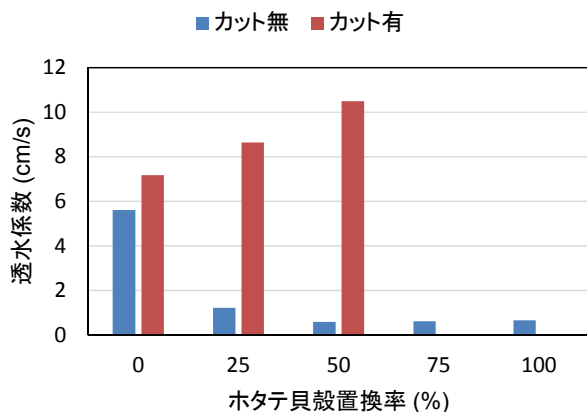


図-6 全空隙率と圧縮強度の関係

る。圧縮強度には空隙の影響が大きく現れるため、図-6 に全空隙率と圧縮強度の関係を示す。一般に全空隙率の増加に伴い圧縮強度は小さくなる。本研究の結果についても、全体的な傾向として空隙率が大きくなるほど圧縮強度が小さくなることがわかる。ただし、貝殻置換率 25 %で (SS25) は大きな強度、置換率 50 % (SS50) および 75 % (SS75) では小さな強度となっている。SS50 および SS75 で圧縮強度が小さくなった理由としては、ホタテ貝殻表面が滑らかでありセメントペーストが付着しづらいこと、ホタテ貝殻は扁平な薄片であり貝殻同士が重



図－7 貝殻置換率と透水係数の関係

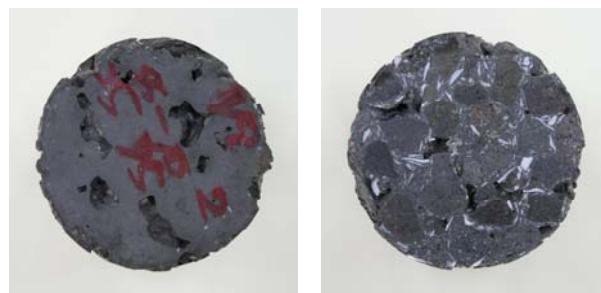
なり合い、その間にセメントペーストが入りづらくなり付着が弱くなったためであると考えられる。

3.5 透水試験結果

図－7 に貝殻置換率と透水係数の関係を示す。供試体底部においてペースト部（モルタル部）の垂れが多く発生していた貝殻置換率 0%、25%および 50%の供試体については、底部をカットした場合についても透水試験を実施した。カット無の結果では、ホタテ貝殻置換率が 0%において透水係数が 5.6 cm/s と大きな値を示したのに対して、ホタテ貝殻を混入した場合には透水係数が 1 cm/s 程度以下と小さくなっていることがわかる。次に透水に大きく影響すると考えられる底部の垂れ部分をカットした場合について検討する。図より底部をカットすることにより透水係数が大きくなっていることがわかる。特に、ホタテ貝殻置換率 25%および 50%では、透水係数の増加量が多い。写真－1 にカット無・有における底面の写真を示す。左の写真がカット無、右の写真がカット有である。貝殻置換率 0% (SS0) のカット無において底部がほぼ閉塞しているのが確認できるが、周辺部においては閉塞しておらず水道ができたため透水性が確保できていたと考えられる。カット有では多くの空孔が有るが透水性の大きな向上にはつながっていない。SS25 および SS50 のカット無において底部に空孔が有るが、透水性の確保にはつながっていないことがわかる。そのカット有の底部における空孔はカット無と同程度であるが、透水性の確保につながっている。カット無ではペースト部（モルタル部）の垂れにより底部付近で水道が閉ざされていたものと推定される。次に、連続空隙が透水性に大きく関係すると考えられるため、図－8 に連続空隙率と透水係数の関係を示す。カット無の結果において、貝殻使用時に限ると、一般的に言われている連続空隙率の増加に伴う透水係数の増加は無く、連続空隙率が 20%以上確保されている SS75 および SS100 の透水係数は、SS0 より小さくなっている。ホタテ貝殻が薄片であるため底部の



(a) SS0

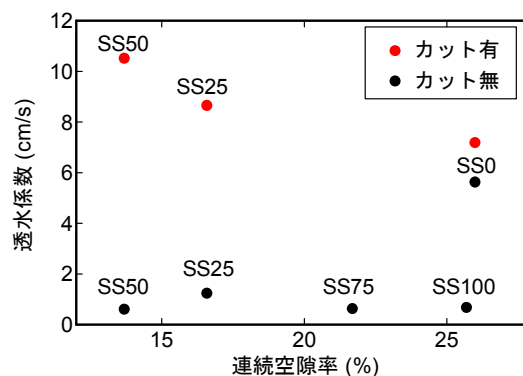


(b) SS25



(c) SS50

写真－1 供試体底面



図－8 連続空隙率と透水係数の関係

貝殻が水平に並び、ペーストの垂れを受け止める状態となり、底部の閉塞状態を助長した結果と考えられる。また、カット有についても一般的な傾向にはなっていない。底部の閉塞状況や薄片である貝殻の配向性などが透水性に影響し、一般的な傾向と異なった結果になったものと推察される。

3.6 保水試験結果

図－9 に貝殻置換率と保水量の関係を示す。ホタテ貝殻置換率 0%に対して、貝殻置換率 25%の保水量は若干減少したが、貝殻置換率 50%以上では保水量が増大した。

また、貝殻置換率が高いほど保水量が大きくなっていることがわかる。保水量にはポーラスコンクリート中の独立空隙が関係するものと考えられることより、図-10に独立空隙率と保水量の関係を示す。独立空隙率が大きくなるに従い、保水量が増加していることがわかる。しかしながら、単純な比例関係ではないため、独立空隙のみが保水性に影響するのではなく、セメントペースト部の空隙および骨材の空隙も保水性に影響するものと考えられる。また、独立空隙率と保水量の間には相関性がみられることより、ホタテ貝殻の形状や配向性等が保水量に及ぼす影響は少ないものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、水結合材比を25%、目標空隙率を20%としたポーラスコンクリートにおいて、ホタテ貝殻を骨材の代替材として用い、破碎したホタテ貝殻を全骨材の0%から100%まで変えて、ポーラスコンクリートの空隙、圧縮強度、透水性、保水性およびセメントペースト部（モルタル部）のフローに関する検討を行った。その結果をまとめると、以下のようになる。

- 1) ホタテ貝殻置換率が高いほどフローが減少する。
- 2) 実空隙率の増減はホタテ貝殻置換率により異なる。
- 3) ホタテ貝殻使用時に限ると、貝殻置換率が多いほど圧縮強度が小さくなる。
- 4) 透水性はセメントペースト部（モルタル部）の垂れの影響を強く受ける。
- 5) ホタテ貝殻使用時に限ると、貝殻置換率が多いほど保水性が高くなる。

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設計・施工法の確立に関する研究委員会：ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム委員会中間報告書・論文集，日本コンクリート工学協会，2002
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 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，

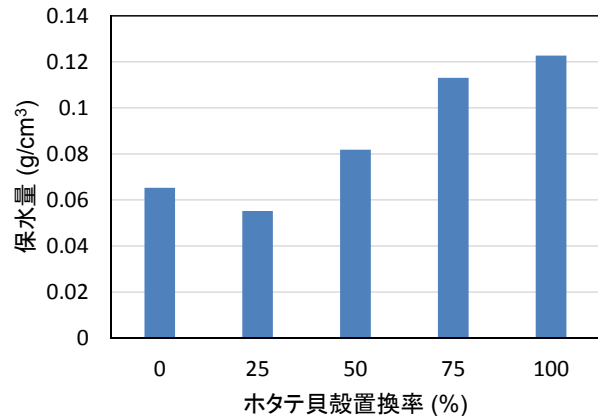


図-9 貝殻置換率と保水量の関係

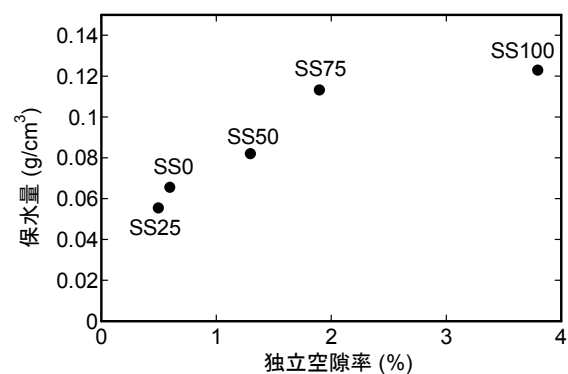


図-10 独立空隙率と保水量の関係

コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1655-1660，2006

- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 日本コンクリート工学協会：JCI 標準集(1977~2002年度)，日本コンクリート工学協会，pp.573-592，2004.
- 10) インターロッキングブロック舗装技術協会：インターロッキングブロック舗装設計施工要領，インターロッキングブロック舗装技術協会，p.付 25，2007