

論文 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

菅田 紀之^{*1}・渡辺 新一^{*2}

要旨：本研究では、粉碎したホタテ貝殻をセメントペースト部分の材料として混入したポーラスコンクリートを作製し、そのポーラスコンクリートの強度特性や透水性に及ぼすホタテ貝殻混入の影響について検討を行った。粉碎した貝殻は粒径が 1.2 mm 以下のものと 1.2 mm から 2.5 mm のものの 2 種類である。その結果、細かいホタテ貝殻を混入した場合に圧縮強度が増加すること、粗いホタテ貝殻を混入した場合に圧縮強度は低下すること、ホタテ貝殻を混入すると空隙率が増加しそれに伴い透水係数が大きくなること、全リンの除去作用にホタテ貝殻の混入は影響しないことが明らかになった。

キーワード：ポーラスコンクリート、ホタテ貝殻、空隙、透水係数、圧縮強度、水質浄化

1. はじめに

現在、全ての産業において地球環境問題への対応が求められており、建設分野においても例外なく多くの検討が行われている。例えば、コンクリート構造物の建設においても環境の保全や自然との共生が重要視されるようになり、環境に対する負荷が少なく生物との共生が可能なコンクリートとしてポーラスコンクリートが注目され、その有用性あるいは新機能等に関する多くの研究が行われてきている¹⁾。

北海道では水産資源としてホタテが年間に約 40 万 t 水揚げされている。水揚げされたホタテは殻つきのまま商品化される場合もあるが、多くはホタテ加工工場において貝殻が取除かれ商品化されたものが店頭に並んでいる。取除かれたホタテの貝殻は水揚げ量の約半分の 20 万 t にもなる。この貝殻のうち約 10 万 t は食品添加物や土壌改良材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 万 t 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起こってきているのが現状である。この問題への対策の一つとして、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), 6)}。また、ポーラスコンクリートに用いた研究例としては、ホタテ貝殻を粗骨材の代替材料として使用することが可能であることを示した小尾らによる研究⁷⁾がある。

本研究では、ホタテ貝殻の一層の有効利用を図るためにコンクリート用材料として用いること、さらにその有効利用を環境対応型のコンクリートで試みた。すなわち、ホタテ貝殻をポーラスコンクリートに適用した。ポーラスコンクリートへの適用において、粗骨材代替として利用可能であることが示されている⁷⁾ので、本研究ではセメントペースト部の代替材料としての可能性を明らかにするために、ポーラスコンクリートの各種特性に及ぼす

ホタテ貝殻混入の影響について検討を行った。本研究で用いたホタテ貝殻は粉碎したもので、粒径が 1.2 mm 以下のものと 1.2 mm ~ 2.5 mm のものの 2 種類である。混入量はセメントペースト部分の容積の 15 % および 30 % である。ホタテ貝殻混入の影響に関する検討は、空隙量、透水性、圧縮強度および水質浄化作用について行った。

2. 実験の概要

2.1 使用材料および配合

本研究において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) およびシリカフェーム (SF) を用いた。使用したシリカフェームの比表面積は 230,000 cm²/g、平均粒径は約 0.2 μm、密度は 2.2 g/cm³ であり、ノルウェー産の粉体系のものである。粗骨材 (G) としては JIS 規格 5 号砕石 (粒径 13 mm ~ 20 mm) を用いた。ホタテ貝殻 (SS) はセメントペースト部分の材料として 2 種類の粉碎したものをを用いた。粒径が 1.2 mm 以下である粉碎したホタテ貝殻を SS1、粒径が 1.2 mm から 2.5 mm である粉碎貝殻を SS2 としてポーラスコンクリートの特性の検討を行った。ここでホタテ貝殻 SS1 の粒度曲線を図-1 に示す。図には土木学会コンクリート標準示方書に示されている細骨材の標準粒度⁸⁾も示した。図より SS1 の粒度は細骨材の標準粒度より若干細かいことがわかる。また、セメントペースト部分の流動性を確保するために、混和剤としてポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤 (SP) を用いた。

本研究におけるポーラスコンクリートの配合を表-2 に示す。ポーラスコンクリートの空隙率としては 25 % を採用した。配合における単位粗骨材量 (G) は粗骨材の実積率に対応する量として 1582 kg/m³ とし、他の単位量はこれに基づいて計算した。水結合材比 (W/B, B = C + SF) は 25 % とし、シリカフェーム置換率 (SF/B) は 10 % とし

*1 室蘭工業大学 工学部建設システム工学科准教授 博 (工) (正会員)

*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設システム工学専攻 (正会員)

表-1 使用材料

| 材 料 | 特性等 |
|-----------------|---|
| セメント (C) | 普通ポルトランドセメント 密度: 3.16 g/cm ³ |
| シリカフェーム (SF) | 比表面積: 230,000 cm ² /g 平均粒径: 約 0.2 μm 密度: 2.2 g/cm ³ |
| 粗骨材 (G) | JIS 5 号砕石 表乾密度: 2.67 g/cm ³ |
| ホタテ貝殻 (SS) | 密度: 2.53 g/cm ³ 粒径: ~ 1.2 mm (SS1) 1.2 ~ 2.5 mm (SS2) |
| 高性能 AE 減水剤 (SP) | ポリカルボン酸系 |

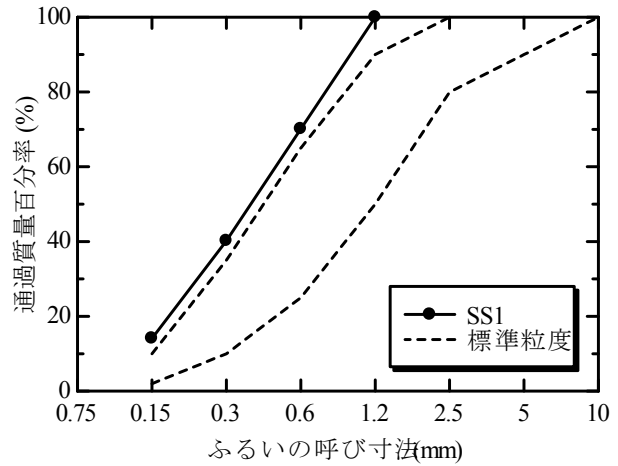


図-1 ホタテ貝殻 (SS1) の粒度曲線

表-2 ポーラスコンクリートの配合

| 実 験 ケース | W/B (%) | SF/B (%) | ss/p (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|------------|------------|-------------|-------------|--------------------------|-----|------|------|------|------|------|
| | | | | W | C | SF | SS1 | SS2 | G | SP |
| N | 25 | 10 | 0 | 67.8 | 244 | 27.1 | 0 | 0 | 1582 | 2.22 |
| SS1-15 | 25 | 10 | 15 | 57.7 | 208 | 23.1 | 59.8 | 0 | 1582 | 2.14 |
| SS1-30 | 25 | 10 | 30 | 47.5 | 171 | 19.0 | 120 | 0 | 1582 | 3.57 |
| SS2-15 | 25 | 10 | 15 | 57.7 | 208 | 23.1 | 0 | 59.8 | 1582 | 2.08 |
| SS2-30 | 25 | 10 | 30 | 47.5 | 171 | 19.0 | 0 | 120 | 1582 | 1.71 |

B = C + SF

ss: ホタテ貝殻容積

p: セメントペースト容積

た。ホタテ貝殻の混入量は、セメントペースト部分の容積の内割りとして 0%、15% および 30% とした。また、高性能 AE 減水剤の添加量については、セメントペースト部分のフローが 180 mm になるように調整し、表のようになった。表から、SS1 のホタテ貝殻を 30% 用いた場合に、必要な高性能 AE 減水剤量が増加していることがわかる。また、その他のケースにおいても、結合材に対する使用率としてみた場合には、高性能 AE 減水剤量は若干増加している。使用したホタテ貝殻は気乾状態のものであり、使用時の含水率は 0.5% 程度であった。吸水率は 1% 程度であるので、ホタテ貝殻が吸水するものとした場合、最大で単位水量の補正量が 0.6 kg 程度になる。また、補正を行わなかった場合、水結合材比の誤差が最大で 0.3% 程度になるが、実験結果に及ぼす影響は少ないものと考えられることより、単位水量の補正については行わなかった。実験ケース名は、ホタテ貝殻を混入していないケースを N、SS1 を混入したケースを SS1-15 (ホタテ貝殻混入率 15%) および SS1-30 (ホタテ貝殻混入率 30%)、SS2 を混入したケースを SS2-15 (ホタテ貝殻混入率 15%) および SS2-30 (ホタテ貝殻混入率 30%) とした。

2.2 供試体の作製方法

ポーラスコンクリートの練混は、水平二軸強制練ミキサーを用い、次のように行った。まず、セメント、シリカフェームおよび粉砕貝殻の空練。水と高性能 AE 減水剤を投入しセメントペーストの練混。その練混ぜ時間は 4 分である。その後、表乾状態の粗骨材を投入し 90 秒間の練混。練上がったコンクリートは、直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱型枠に 1 層で詰め、卓上バイブレータを用いて締固めを行った。振動締固め時間は 10 秒である。振動により沈下した部分にはコンクリートを追加投入し、供試体の表面をコテでならして成型した。養生方法は、コンクリート打込み後 1 日間は 20 ± 1 °C での封緘養生、材齢 1 日目以降から 20 ± 1 °C での水中養生である。

2.3 空隙率試験

ポーラスコンクリートの空隙率試験は、直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体を用いて行い、連続空隙率、全空隙率および独立空隙率を求めた。測定は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空隙率試験方法(案)⁹⁾の容積法に従って行った。1 ケースにつき 5 本の供試体を用いて値を算定した。

2.4 圧縮強度試験

ポーラスコンクリートの圧縮強度試験は、材齢 28 日まで 20 °C の水中で養生を行った直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱供試体を用いて、JIS A 1108 に従って行った。1 ケースにつき 5 本の供試体を用いて値を算定した。供試体の載荷面の処理は、上面については研磨機を用いて研磨を行い、その後両端面を、硬質石コウを用いたキャッピング処理とした。

2.5 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。1 ケースにつき 5 本の供試体を用いて値を算定した。実験時における水頭差は 39 mm ~ 60 mm、動水勾配は 0.2 ~ 0.3 であった。

2.6 水質浄化試験

本研究の水質浄化試験では、全リンの除去作用に関する試験を行った。試験は、全リン濃度 1 mg/l の水溶液 15 l を内寸法 560 mm × 260 mm × 180 mm の容器に入れ、その中に供試体 2 本を沈めて行った。水溶液の作製にはリン酸二水素カリウム (KH₂PO₄) を用いた。試験期間は 14 日間とし、全リン濃度の測定は、試験開始時、1 日、3 日、7 日および 14 日とした。全リン濃度の測定方法は、酸性過硫酸分解・モリブデン青 (アスコルビン酸) 法である。

3. 試験結果および考察

3.1 空隙率試験結果

図-2 にホタテ貝殻混入率と全空隙率の関係を示す。横軸に貝殻の混入率を取り、縦軸に全空隙率を取り示している。全空隙率の値は 31.1 % から 34.6 % の値になり、配合において設定した空隙率 25 % に比較して 6 % から 10 % 大きな結果となった。これの一つの要因は、配合において単位粗骨材量を骨材の実積率に対応するように定めたためであると考えられる。すなわち、配合では実積率試験時と同様に粗骨材がお互いに直接接触している状態を仮定し、単位量を算定しているが、実際のポーラスコンクリートでは、骨材間にセメントペーストが入り込み接触する割合が少なくなり、骨材間の距離が離れたことが要因と考えられる。また、供試体サイズが小さいほど空隙率が大きくなるという検討結果¹⁰⁾もあり、供試体サイズの影響も要因の一つと考えられる。

次にホタテ貝殻混入の影響について検討を行う。ホタテ貝殻を混入していないポーラスコンクリートの全空隙率は 31.1 % である。それに対して SS1 を用いたポーラスコンクリートの全空隙率は 32.3 % および 32.0 % であり、

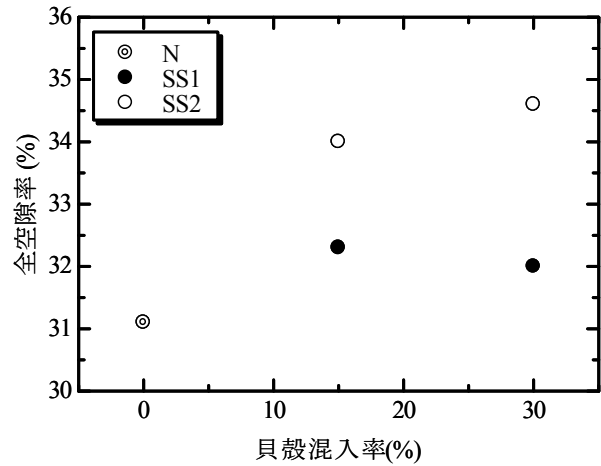


図-2 全空隙率

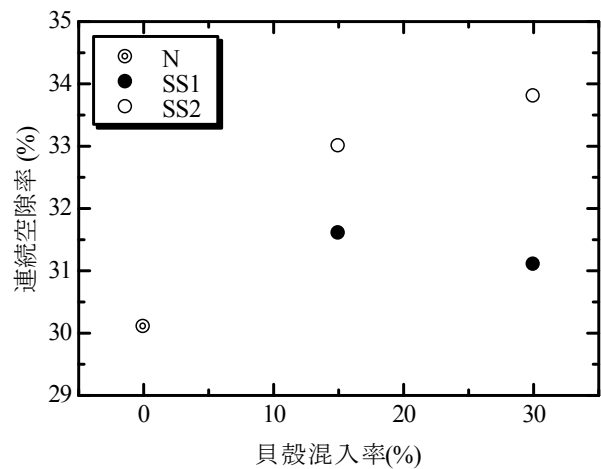


図-3 連続空隙率

SS1 を用いた場合に若干空隙率が大きくなっている。また、SS2 を用いたポーラスコンクリートの全空隙率は 34.0 % および 34.6 % であり、SS2 を用いた場合に 3 % 程度空隙率が大きくなっていることがわかる。ホタテ貝殻を混入した場合、粗骨材間に入込んだ貝殻が締固めの際に障害となり、粗骨材間の距離が貝殻無混入のポーラスコンクリートよりも大きくなったために空隙率が大きくなったと考えられる。

図-3 にホタテ貝殻混入率と連続空隙率の関係について示す。横軸に貝殻の混入率を取り、縦軸に連続空隙率を取っている。連続空隙率の値は、全ての実験ケースにおいて、全空隙率よりも 1 % 程度小さな結果となった。ホタテ貝殻を混入していないポーラスコンクリートの連続空隙率は 30.1 %、それに対して SS1 を用いたポーラスコンクリートの連続空隙率は 31.6 % および 31.1 % であり、SS1 を用いた場合に若干空隙率が大きくなっている。また、SS2 を用いたポーラスコンクリートの連続空隙率は 33.0 % および 33.8 % であり、SS2 を用いた場合に 3 % 程度空隙率が大きくなっている。

また、ここでは示していないが、全空隙率と連続空隙率の差として求められる独立空隙率については、以上の結果からわかるように、全ての実験ケースにおいて1%程度であり、貝殻の混入による影響は見られなかった。

3.2 透水試験結果

図-4にホタテ貝殻混入率と透水係数の関係を示す。横軸に貝殻混入率を取り、縦軸に透水係数を取り示している。透水試験における動水勾配は0.2~0.3である。ホタテ貝殻を用いていないポーラスコンクリートの透水係数は8.0 cm/sであった。それに対してSS1を混入したポーラスコンクリートの透水係数は9.1 cm/s および 8.9 cm/s であり、SS1を混入した場合に若干透水係数が大きくなった。SS2を混入したポーラスコンクリートの透水係数は10.4 cm/s および 12.3 cm/s であり、貝殻無混入の場合より大きくなっている。また、SS2を混入した場合には、貝殻混入率と透水係数の関係が、ほぼ直線状になっていることがわかる。ホタテ貝殻を用いた場合に透水係数が大きくなるのは、連続空隙量が多いためであると考えられる。

そこで、図-5に連続空隙率と透水係数の関係を示す。横軸に連続空隙率を取り、縦軸に透水係数を取り示している。一般に言われているように、連続空隙率の増加とともに透水係数が大きくなる関係が得られた。また、図より、連続空隙率と透水係数の関係を、1つの曲線を用いて示すことが可能であると考えられる。

3.3 圧縮強度試験結果

図-6にホタテ貝殻混入率と圧縮強度の関係を示す。横軸に貝殻混入率を取り、縦軸に圧縮強度を取り示している。圧縮強度試験は20℃の水中で28日間養生を行った供試体を用いて行った。1ケースにつき5本の供試体の圧縮強度試験を行い、その平均値を示している。ホタテ貝殻を混入していないポーラスコンクリートの圧縮強度が11.4 N/mm²であるのに対して、SS1を混入した場合の強度は12.0 N/mm² および 12.4 N/mm² であり、SS1の貝殻を混入した場合に圧縮強度が若干増加していることがわかる。また、混入率が高いほど圧縮強度が大きくなっている。一方、SS2を混入したポーラスコンクリートの圧縮強度は9.2 N/mm² および 8.7 N/mm² であり、SS2を混入することにより圧縮強度が19%から24%減少していることがわかる。また、混入率が大きくなるに従い強度が減少している。このように、混入するホタテ貝殻の粒度の違いにより、圧縮強度に及ぼす貝殻混入の影響は異なった結果となった。

次に、圧縮強度に空隙量が大きく影響することがわかっているため、全空隙率と圧縮強度の関係を図-7に示し、検討を行う。横軸に全空隙率を取り、縦軸に圧縮強度を取っている。一般には全空隙率が多くなるに従い圧

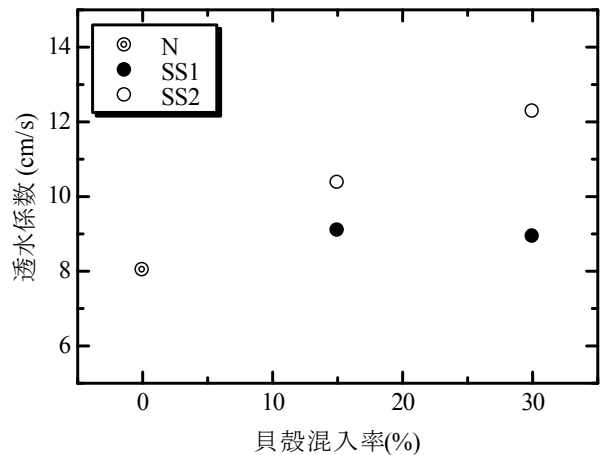


図-4 透水係数

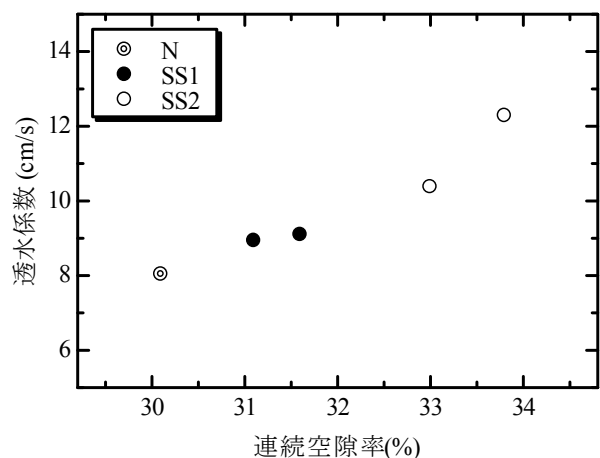


図-5 連続空隙率と透水係数の関係

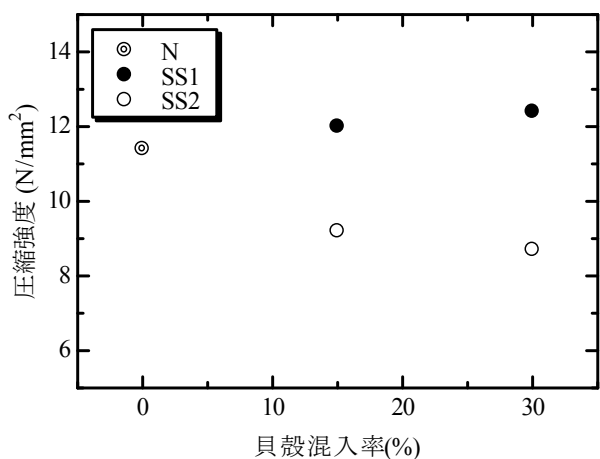


図-6 圧縮強度

縮強度は減少するが、SS1を用いた場合には空隙率が大きくなっても強度は減少せずに増加していることがわかる。このことより、SS1の混入は圧縮強度の増加に効果があると判断することができる。一方、SS2を用いた場合には空隙率の増加に従い圧縮強度は小さくなっている。SS2の混入による圧縮強度の低下が、貝殻の直接要因に

よるものなのか空隙率増加によるものなのかを、以上の結果から判断することはできなかった。

3.4 水質浄化試験結果

図-8および図-9に水質浄化試験の結果を示す。全リン濃度1 mg/lの水溶液15 lに直径100 mm,高さ200 mmのポーラスコンクリートを2本沈めて14日間試験を行った。横軸に試験の経過日数を取り、縦軸に全リンの除去率を示している。SS1を用いた場合について検討を行う。試験日数1日における全リンの除去率は、貝殻無混入で36%,貝殻15%混入で37%,貝殻30%混入で31%となり、試験日数1日で約1/3の全リンが除去されたことになる。しかしながら、その後の除去率の増加は少なく、試験日数14日までに貝殻無混入および15%混入で12%,貝殻30%混入で18%の増加であり、14日における除去率は、それぞれ48%,49%および50%である。この結果からSS1の貝殻混入の全リン除去に及ぼす影響は少ないと判断できる。

図-9においてSS2を用いた場合について検討を行う。試験日数1日における全リンの除去率は、貝殻15%混入で37%,貝殻30%混入で35%となり、SS1の結果と同様に試験日数1日で約1/3の全リンが除去されたことになる。その後の除去率の増加はSS1を混入した場合と同様に少なく、試験日数14日までに貝殻15%混入で16%,貝殻30%混入で14%の増加であり、14日における除去率は、それぞれ53%および49%である。このことより、SS1と同様にSS2混入の全リン除去に及ぼす影響は少ないと判断できる。

4. まとめ

本研究では、処分地の確保等が問題になっているホタテ貝殻の有効利用方法として、ポーラスコンクリートへ混入することを考え、検討を行った。水結合材比25%,シリカフェーム置換率10%,空隙率25%に設定したポーラスコンクリートのセメントペースト部分の材料として粉砕したホタテ貝殻を用いた。ホタテ貝殻は粒径を1.2 mm以下に砕いたものと、1.2 mmから2.5 mmの大きさに砕いたものの2種類である。ホタテ貝殻の混入量はセメントペースト部分の容積の内割りで0%,15%および30%と設定し、ポーラスコンクリートの空隙量,透水性,圧縮強度および水質浄化作用に関して検討を行った。試験を行った結果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 粉砕したホタテ貝殻をセメントペースト部分の材料として用いた場合、全空隙率および連続空隙率が増加する。
- (2) ポーラスコンクリートのセメントペースト部分の材料としてホタテ貝殻を混入した場合、連続空隙率の増加に伴い透水係数が大きくなる。

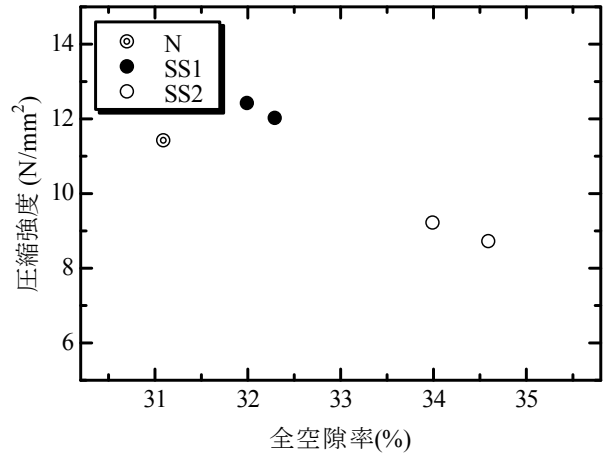


図-7 全空隙率と圧縮強度の関係

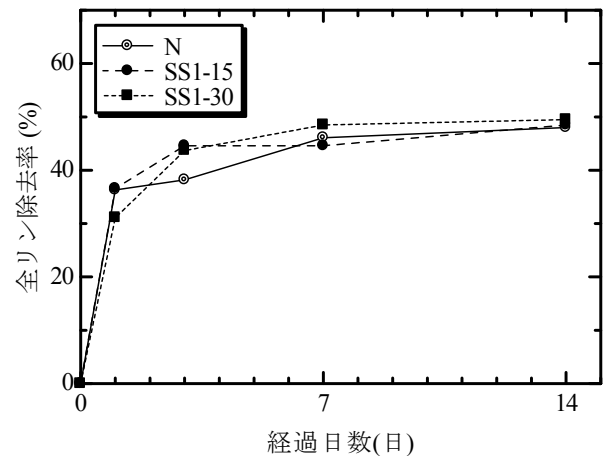


図-8 SS1を用いた場合の全リン除去率

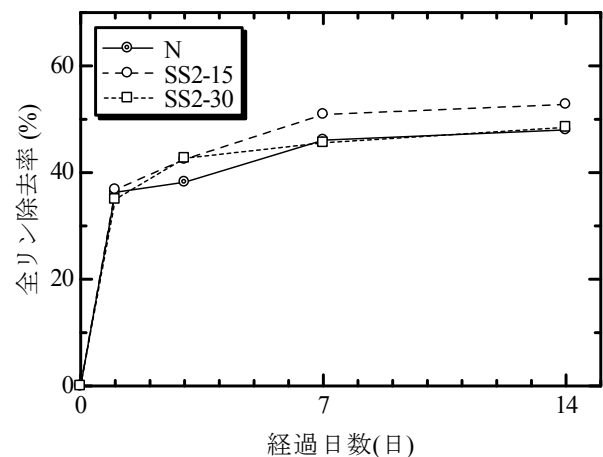


図-9 SS2を用いた場合の全リン除去率

- (3) セメントペースト部分の材料として粒径1.2 mm以下のホタテ貝殻を混入した場合、圧縮強度は若干増加する。一方で、粒径1.2 mmから2.5 mmの貝殻を混入した場合、圧縮強度は小さくなる。
- (4) ポーラスコンクリートの全リンの除去作用に及ぼすホタテ貝殻の混入の影響は少ない。

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，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1649-1654，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) 北條泰秀ほか：細粉碎したホタテ貝殻のコンクリート利用に関する検討，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)，5-421，2007
- 7) 小尾 稔，田口史雄：ホタテ貝殻を用いたポーラスコンクリートの基本特性に関する研究，土木学会第60回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM)，5-438，2005
- 8) 土木学会コンクリート委員会：[2002年制定] コンクリート標準示方書 [施工編]，土木学会，pp.62-63，2002
- 9) 日本コンクリート工学協会：JCI 規準集 (1977～2002年度)，コンクリート工学協会，pp.573-592，2004
- 10) 越 健，島崎 磐，国枝 稔，六郷恵哲：ポーラスコンクリートの空隙率と空隙率分布の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.1，pp.259-264，1999