

論文 竹炭とセメントを用いた多孔質な複合材料の性質

迫田 恵三^{*1}, 渡邊 晋也^{*2}, 梅澤 智美^{*3}

要旨：本研究は、里山を構成している竹の有効利用を目的としたもので、竹から得られた竹炭を強化材、セメントをマトリックスとする多孔質な複合材料の力学的性質や海水浄化作用および海洋付着生物量に及ぼす影響に関する報告である。実験はポーラスな複合材料の圧縮強度、曲げ強度、単位容積質量およびこの複合材料を使用した場合の海水中のリン酸塩、ケイ酸塩の溶存量や海洋付着生物量を求めた。その結果、圧縮強度、曲げ強度は砕石を使用したポーラスコンクリートの 1/7 および 1/10 となったが、海水の浄化作用に効果があり、海洋付着生物量が大きくなることが分かった。

キーワード：竹、竹炭、複合材料、圧縮強度、海水浄化、海洋付着生物

1. はじめに

竹の種類は我が国だけでも約 600 種に達するといわれ、古くから竹林として傾斜地の崩壊や、河川堤防の決壊防止に利用されてきた。他方、竹は建築資材や家具および食用としても広く利用されてきた。しかし、近年、竹の需要の減少や高齢化などの影響もあって、竹による里山の荒廃が問題となっている。その一例として茶畑や杉林への侵食が各地で顕在化している。竹を建設材料として使用する試みは、建築の土壁を補強するために行われてきたが、近年では竹を炭化した「竹炭」を除湿作用や断熱効果を期待した利用が広まりつつある。また、竹炭をセメントと複合した複合材料の水質浄化作用や生物付着についてこれまでいくつかの報告がなされ、その効果が明らかにされている^{1,2,3,4)}。しかしながら、これまでの報告は竹炭をセメント硬化体で被覆した状態のままであり、竹炭の多孔質性や表面積の大きさを有効に利用するためには竹炭の特徴を生かした利用法が必要と考えられる。

そこで本研究ではセメントをマトリックス、

竹炭を強化材としたポーラスな複合材料を考え、この複合材料の力学的性質、海洋付着生物量、および海水浄化に及ぼす影響について研究を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用したセメントは、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³）である。竹炭と砕石の物理的性質を表-1 に示した。竹炭は静岡県静岡市産を使用した但其の密度は 0.76 g/cm³と小さく、吸水率は 49.9%と大きい。また、竹炭の形状が細長いことから実績率は 41.9%と小さい。

表-1 竹炭と砕石の物理的性質

項目	竹炭	砕石
産地	静岡県 静岡市産	静岡県 宇久須産
密度 (g/cm ³)	0.76	2.60
吸水率 (%)	49.9	2.5
単位容積質量 (t/m ³)	0.32	1.51
実績率 (%)	41.9	58.4

*1 東海大学 海洋学部海洋土木工学科教授 工博（正会員）

*2 東海大学大学院 海洋学研究科海洋工学専攻（正会員）

*3 株式会社サンユウシビルエンジニアリング

表-2 配合

骨材種類	最大寸法	最小寸法	骨材補正係数	目標空隙率	W/C	W	C	G	SP
	mm	mm	α	%	%	kg/m ³			C × %
竹炭	25	15	0.98	25	30	165	550	314	0.7
砕石	20	5	0.98	26	25	74	295	1488	0.7

SP：高性能 AE 減水剤

2.2 配合

複合材料の配合を表-2に示す。竹炭を用いた場合、目標空隙率は25%、水セメント比は30%、砕石を用いた場合には目標空隙率26%、水セメント比は25%に設定した。

2.3 供試体の作製

供試体の製作は強制練りミキサーを使用した。まず、セメントと竹炭を30秒間ドライミックスし、その後、水を添加し2分間練り混ぜた。型枠底部にセメントペーストを敷き、竹炭を用いた複合材料を2層に分けて詰め、締め固めは突き棒を用いて1層11回、竹炭を破壊しない程度に突いた。供試体は、直径10センチ、高さ20cmの円柱供試体と縦10cm、横10cm、長さ40cmの角柱供試体を使用した。水質浄化試験、海洋生物付着試験用供試体は縦10cm、横10cm、高さ10cmの立方体供試体を使用した。

2.4 養生方法および暴露方法

供試体を脱型後1週間の標準養生を行った。力学的性質を求めるための供試体は、標準養生、海水浸漬および屋外暴露を行った。屋外暴露は静岡県静岡市清水で行ったが、清水の年平均気温は17.0℃で冬季の平均気温は5℃を超え氷点下になることは極めて稀である。

海洋付着生物試験のための供試体暴露は、2003年7月から10月の3ヵ月間静岡県清水港折戸湾の水深2mで行った。暴露期間での折戸湾の海況は水温22.2～27.5℃、塩分量29～31‰である。

2.5 測定項目および測定方法

表-3に測定項目、測定方法を示す。力学的性質の測定は材齢1, 4, 13週で行った。海洋付着生物の測定は、供試体を回収後、ホルマリン溶

液に浸漬し、気中乾燥後付着生物の測定を行った。海水浄化試験は清水港折戸湾の海水を採水して実験室内で行った。容量800ℓのコンテナに海水を入れ、ポンプで循環させた。海水の水質試験は供試体を浸漬後1, 3, 7, 14, 21日で行った。

表-3 試験項目および方法

空隙率試験	JCI「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」
透水試験	JCI「ポーラスコンクリートの透水試験方法(案)」
単位容積質量試験	JIS-A-1104
超音波伝播速度試験	JCI「超音波パルス伝播速度の標準測定方法(試案)」
動弾性係数	JIS-A-1127
圧縮強度試験	JIS-A-1108「コンクリートの圧縮強さ試験方法」
曲げ強度試験	JIS-A-1106「コンクリートの曲げ強度試験方法」
リン酸塩濃度の測定 ⁵⁾	Murphy and Riley(1961)の方法
ケイ酸塩濃度の測定 ⁵⁾	Grasshoff et al.(1983)の方法

3. 実験結果および考察

3.1 空隙率、透水係数

空隙率、透水係数の結果を表-4に示す。空隙率は目標空隙率が25%であり、試験の結果、全空隙率は26.9%、連続空隙率は24.5%が得られた。竹炭の形状は厚みがなく細長いものであるが、目標とする空隙率を得ることができた。透水係数は 2.55×10^{-2} cm/sという結果が得られた。砕石径13mm～20mmを使用したポーラスコンクリートの場合、空隙率が25%では2.4cm/sという報告⁶⁾がある。竹炭を用いた場合には透水性が同一空隙のポーラスコンクリートと比較し

て小さい結果となった。既往の文献では骨材の粒径が小さいほど透水係数が小さくなるという報告⁹⁾があるが竹炭の場合には粒径より粒形の方が影響を及ぼしたものと考えられる。

3.2 単位容積質量

複合体の単位容積質量を図-1に示す。標準養生4週における単位容積質量の結果は、 1.34 t/m^3 が得られた。これは竹炭の密度が 0.76 g/cm^3 と小さく、吸水率が 49.9%と大きいことが原因である。養生別で見ると海水浸漬の場合は標準養生と同程度の値が得られた。これに対し、屋外暴露の場合、乾湿繰り返し作用を受けるため、標準養生と比較すると材齢13週では約 0.2 t/m^3 低くなっている。

3.3 超音波伝播速度

複合体の超音波伝播速度を図-2に示す。一般にコンクリートの超音波伝播速度は、コンクリートの配合、使用骨材の密度などに影響されるが、その速度は約 $4 \sim 5 \text{ km/s}$ 程度といわれている。竹炭を用いた複合材料の超音波伝播速度は、標準養生の材齢4週では 2 km/s の値が得られた。この値は、普通骨材を使用したコンクリートの超音波速度の $1/2$ 程度である。これは竹炭の密度が低いことと、竹炭を用いた複合材料の空隙率が大きいことが原因である。他方、海水浸漬、屋外暴露を行った超音波速度は、暴露日数の経過とともに低下する傾向がみられる。これは供試体の目視観察の結果、暴露供試体のセメント硬化体と竹炭との界面にひび割れが存在し、これが超音波速度に影響を及ぼしたものと考えられる。

3.4 動弾性係数

複合体の動弾性係数を図-3に示す。竹炭を用いた複合材料の動弾性係数は、標準養生の材齢4週では約 $0.3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ の値が得られた。これは普通骨材を用いたコンクリートの動弾性係数の $1/10$ 程度である。このような低い結果になった原因は、超音波伝播速度の考察でも述べたように竹炭の密度が低いことと、竹炭を用い

た複合材料の空隙率が大きいことが理由として考えられる。一方、海水浸漬、屋外暴露を行った場合の動弾性係数は、暴露材齢の経過とともに低下する傾向がみられる。これは屋外暴露の場合、乾湿繰り返し作用が影響し、海水浸漬の

表-4 空隙率、透水係数の結果

試験項目		竹炭	砕石
全空隙率	%	26.9	29.6
連続空隙	%	24.5	28.7
透水係数	cm/s	2.55×10^{-2}	—

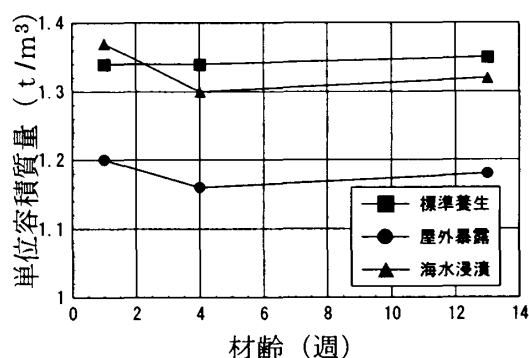


図-1 単位容積質量の経時変化

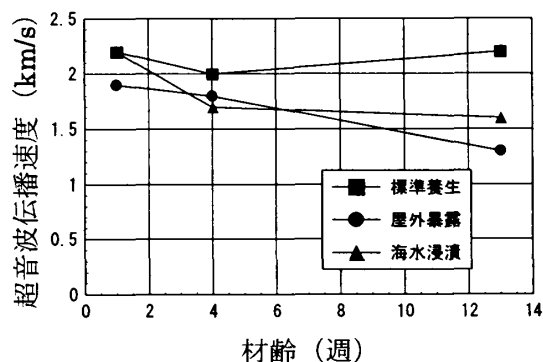


図-2 超音波伝播速度の経時変化

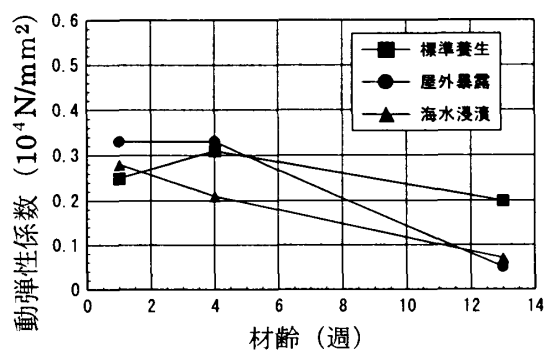


図-3 動弾性係数の経時変化

場合、エトリンガイトの生成による膨張が、セメント硬化体と竹炭界面のひび割れにつながり、その結果、動弾性係数に影響したものと考えられる。

3.5 圧縮強度

複合体の圧縮強度を図-4に示す。この圧縮強度の結果は、6試料の圧縮強度の平均値を表したものである。竹炭を用いた複合材料の標準養生、材齢4週の圧縮強度は、1.5MPaの値が得られた。この強度は普通の骨材を用いた空隙率25%のポーラスコンクリート圧縮強度 10N/mm^2 の⁶⁾1/7程度の強度である。これは竹炭の吸水率が49.9%と大きいために、竹炭の強度が弱いことが原因と考えられる。標準養生の場合、セメント硬化体は材齢の経過とともに強度は大きくなるが、竹炭の強度が弱いために竹炭が破壊し、材齢の経過とともに強度の伸びが期待できない結果になっている。

図-5は竹炭を用いた複合材料の単位容積質量と圧縮強度の関係を示している。両者の関係は標準養生の場合相関係数が0.63となっているが、海水浸漬では0.79、屋外暴露の場合0.78と相関がみられた。

3.6 曲げ強度

標準養生を行った複合体の曲げ強度を図-6に示す。竹炭を用いたポーラスな複合材料の場合には、材齢の経過に伴う曲げ強度の伸びは期待できない結果となった。これは、竹炭を水中に浸漬した場合、材齢の経過とともに竹炭が劣化したか、セメント硬化体の膨張が、竹炭とセメント硬化体との界面のひび割れにつながり、強度を低下させたものと考えられる。材齢4週における曲げ強度は0.33MPaが得られた。一般にポーラスコンクリートの場合、空隙率が大きくなると曲げ強度も低下すると言われているが、空隙率25%程度で約3.5MPaという報告がある⁶⁾。竹炭を用いた複合材料の曲げ強度はポーラスコンクリートの約1/10となっている。圧縮強度・曲げ強度比は普通の骨材を用いたコンクリート

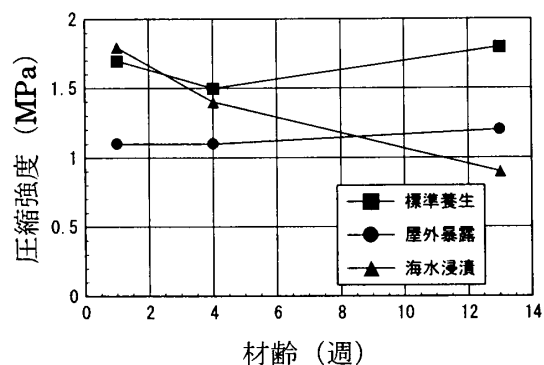


図-4 圧縮強度の経時変化

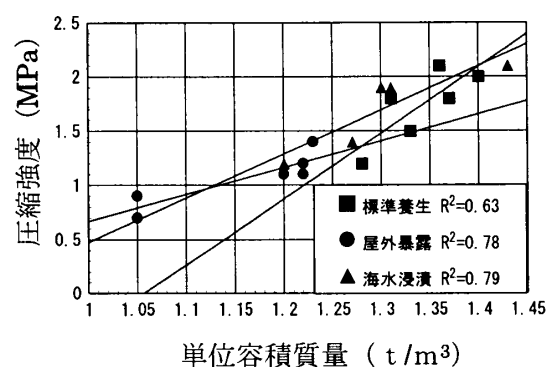


図-5 圧縮強度と単位容積質量の関係

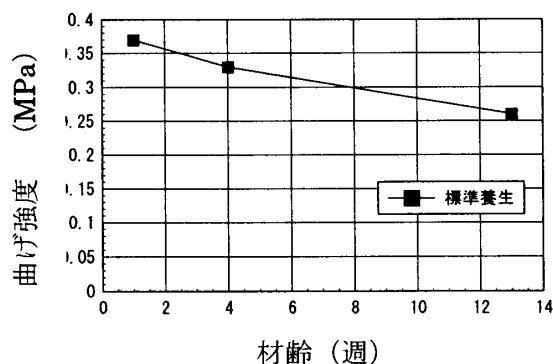


図-6 曲げ強度の経時変化

と同程度である。

3.7 海洋付着生物量

写真-1は竹炭を用いた複合材料、写真-2は砕石を用いたポーラスコンクリートの海中暴露前の状態を示している。竹炭および砕石を用いた供試体は、竹炭、砕石が表面に露出し、表面

の凹凸が大きく、海洋付着生物が付着しやすい形状となっている。

写真-3に暴露3箇月後の竹炭を用いた供試体の海洋付着生物の付着状況と、写真-4に碎石を用いた供試体の付着状況を示している。暴露期間が3箇月という短期間にもかかわらず立方供試体の全面に海洋付着生物が付着していた。

海中暴露期間3箇月間に供試体に付着した海洋付着生物の種類と個体数を表-5に示す。暴露した清水港折戸湾はリン酸塩、ケイ酸塩などの栄養塩に富んでおり、カキ類、フジツボ類などの成長が早いとされている。暴露3箇月間で付着した海洋付着生物は、ムラサキ貝、フジツボ類および大型二枚貝である。この内ムラサキ貝の付着が最も多く、次いでフジツボ類、大型二枚貝の順となっている。海洋付着生物の個体数は、碎石を用いた供試体で123個、竹炭を用い

表-5 海洋付着生物の種類と個体数

	碎石			竹炭		
	ムラサキ貝	フジツボ類	大型二枚貝類	ムラサキ貝	フジツボ類	大型二枚貝類
上面	14	8	11	56	9	11
下面	3	0	1	11	4	9
側面	37	33	16	69	21	13
合計	54	41	28	136	34	33
総合計	123			203		

た供試体で203個と後者のほうが1.85倍多い。

3.8 海水の浄化

図-7および8は、竹炭を用いた複合材料および碎石を用いたポーラスコンクリートを海水に浸漬した場合のリン酸塩およびケイ酸塩の除去結果を示している。図中の基準水は清水港折戸湾の海水の値を表している。本研究で海水浄化の対象としたものはリン酸塩、ケイ酸塩であるが、これらは栄養塩の一種で植物プランクトンの増殖の要因となり、海水に含まれるこれらの量が多くなると富栄養化し、赤潮の原因となる

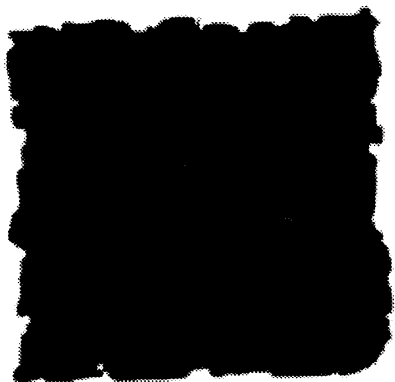


写真-1 暴露前の供試体（竹炭）



写真-3 暴露後の供試体（竹炭）

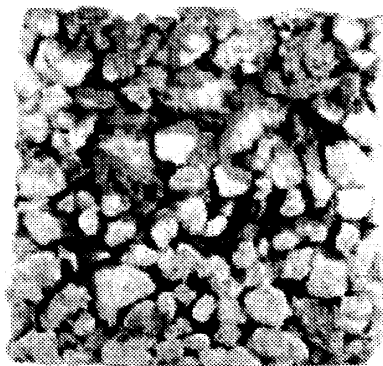


写真-2 暴露前の供試体（碎石）

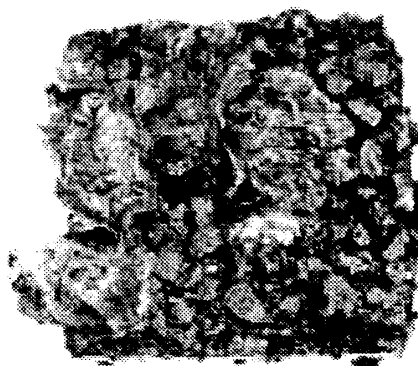


写真-4 暴露後の供試体（碎石）

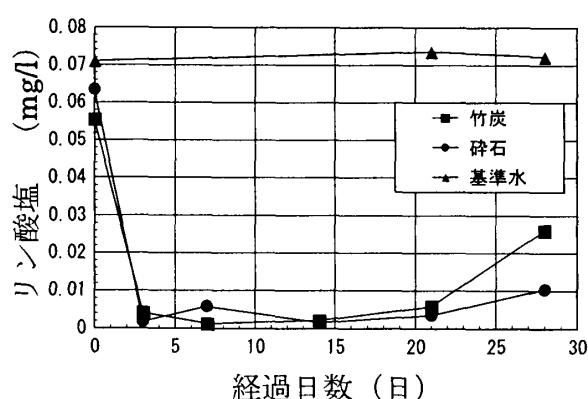


図-7 海水浸漬後のリン酸塩の変化

ことが知られている。海水を採取した清水港の折戸湾は、閉鎖海域で海水汚濁が問題となっているところである。図からも明らかなように竹炭、砕石を用いたポーラスな複合材料の場合、浄化開始後に測定した結果より、3日後に測定したリン酸塩およびケイ酸塩は急激に減少しており、その後の変化は少ない結果となっている。ポーラスな複合材料は、海水浄化に対して顕著な効果がみられた。

4. まとめ

竹の有効利用を目的に竹炭を用いたポーラスな複合材料の力学的性質、海洋付着生物量および海水浄化について研究を行った結果、以下のような知見が得られた。

- 1) 圧縮強度および曲げ強度は、砕石を用いたポーラスコンクリートのような強度は期待できないが、普通コンクリートを基盤として竹炭を用いたポーラスな複合材料を表層に打設するような2層構造とする事や、また竹炭と砕石の混合などにより強度の改善が期待できる。
- 2) 竹炭を用いた複合材料の海洋付着生物量は、砕石を用いたポーラスなコンクリートより多い
- 3) 竹炭を用いた複合材料の海水浄化は、リン酸塩、ケイ酸塩の量が浄化開始後、短期間に減少した。砕石ポーラスコンクリートと同様に海水浄化に効果があることがわかった。

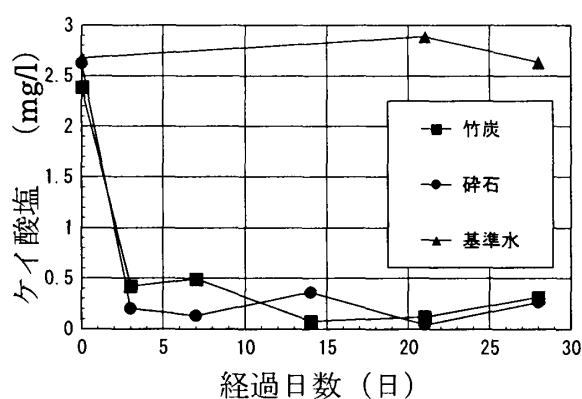


図-8 海水浸漬後のケイ酸塩の変化

参考文献

- 1) 世利桂一, 徳永隆司, 中村融子, 野田和孝, 倉富伸一: 植物系炭化物を混合した機能性コンクリートの調整と水質上か特性, 第50回日本木材学会研究発表要旨集, pp542, 2000. 4
- 2) 大竹孝明, 上村芳三, 吉田昌弘, 幡手泰雄, 佐藤祐一, 国分修三, 羽野忠: 微生物固定化竹炭を用いた河川の水質浄化技術の開発, 化学工学年会研究発表講演旨集, pp813, 2002. 3
- 3) 世利桂一, 平野吉男, 倉富伸一, 徳永隆司, 中村融子: 木質系炭化物を混合した多機能コンクリートの調整とキャラクターゼーション, 第5回日本木材学会九州支部大会講演集, pp. 67-68, 1998
- 4) 土田大輔, 中村融子, 徳永隆司, 世利桂一, 倉富伸一: 竹炭入りコンクリートによる水質浄化, 福岡県保険環境研究所年報第28号, pp. 105-109, 2001. 12
- 5) 気象庁: 海洋観測指針 (第1部), 財団法人気象業務支援センター, pp. 82-85, 2000. 11
- 6) 社団法人 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設計, 施工法の確立に関する研究委員会 委員会報告書 (2003. 6), 2003. 5