

論文 孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの各種性能評価

山田 宏*1・牛之濱大星*2・関 友則*3・小塚 規行*4

要旨：高い引張特性などの特徴を有する孟宗竹の有効利用を目指して、舗装用材料としての孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの開発を行っている。本論文では、孟宗竹繊維と粗骨材の混合物の実積率によって配合設計した硬化体を用いて、孟宗竹繊維の含水状態および混入量に着目して、孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの基本的な硬化物性に関する評価を行った。その結果、孟宗竹繊維の含水状態および混入量が孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの透水性、圧縮強度、曲げ強度、曲げタフネスおよび骨材の飛散抵抗性に与える影響を明らかにした。

キーワード：孟宗竹繊維、含水状態、ポーラスコンクリート、曲げ強度、配合設計

1. はじめに

鹿児島県の竹林面積は国内で最も多く、その大半を孟宗竹が占める。孟宗竹は3年程度で十分生育する地域資源であるが、著しい生育速度である孟宗竹が放置されると、他植生の侵食や土砂災害を誘発する竹害¹⁾が懸念される。薩摩川内市などでは、竹を効率的に回収するシステムが試行されており、地域環境問題などの解決を踏まえた新たな産業都市モデルの形成を目指している。

孟宗竹の特徴は、生育スピードが早いこと以外にも、物質貯留や移動経路の維管束（異なる径の管が集まった組織）に由来する70%~80%の高い吸水率や、維管束周囲の繊維に由来する100N/mm²以上の引張強度である。

孟宗竹の高い引張特性を活かして、繊維補強材としてコンクリートやポーラスコンクリートに用いる試み^{2), 3)}がなされているが、高い吸水率を有する孟宗竹の含水状態の影響を十分に把握しているものではない。特にポリカルボン酸系高性能減水剤を必須とする水セメント比の低いポーラスコンクリートについては、わずかな水量の変化で流動性や硬化物性が大きく異なることが予想される。このため、孟宗竹の含水状態がポーラスコンクリートの各種性能に与える影響を把握することは必要不可欠と言える。

筆者らは、孟宗竹繊維をポーラスコンクリートに活用することを目指し、これまでにポーラスコンクリートのバインダーとなるペーストを対象として、孟宗竹の含水状態に着目して、ペーストと孟宗竹繊維の間で生じる水分の移動が流動性および圧縮強度に与える影響を検討してきた⁴⁾。その結果、孟宗竹繊維を用いたペーストは繊維の含水状態によって流動性が異なること、孟宗竹繊維を用いたペーストの圧縮強度は、孟宗竹繊維の含水状態

の影響をほとんど受けないことなどを明らかにした。

本研究では、これまでの検討に続く次のステップとして、舗装用材料としての孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの適用性を検討するため、孟宗竹繊維の含水状態および混入量に着目して、ポーラスコンクリートの配合設計法の検討に始まり、基本的な硬化物性である空隙率、透水性、圧縮強度、曲げ強度、曲げタフネスおよび骨材の飛散抵抗性に関する評価を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料は普通ポルトランドセメント（略号：C、密度3.15g/cm³）、粗骨材（略号：G、6号砕石、表乾密度2.63g/cm³、実積率56.2%）、ポリカルボン酸系高性能減水剤（密度1.06g/cm³）を用いた。孟宗竹繊維は、鹿児島県始良市産の3年以上生育した孟宗竹（生竹）を木材チップパーで細断したチップ（略号：Bf、外観：写真-1参照、



写真-1 孟宗竹繊維の外観

*1 鹿児島工業高等専門学校 都市環境デザイン工学科准教授 博士（工学）（正会員）

*2 鹿児島工業高等専門学校 都市環境デザイン工学科

*3 住友大阪セメント(株) 建材事業部 技術グループ 博士（工学）（正会員）

*4 住友大阪セメント(株) 執行役員 建材事業部長

平均長 30mm, 幅 0.1~5.0mm, 平均厚さ 0.1~2.0mm, 表乾密度 1.19g/cm³, 吸水率 77.6%, 吸水特性: 図-1 参照) をなるべく加工しない条件での使用を考えたため, チップのまま, 細径・太径混合の短繊維として用いた。

2.2 配合

ポーラスコンクリートの配合設計では, 粗骨材の実積率から単位粗骨材量を算出し, 目標とする空隙率となるようなペースト量あるいはモルタル量を算出する。齋藤・出村のビニロン繊維補強ポーラスコンクリートに関する研究^{5) 6)}では, 繊維量が増加すると, 繊維と粗骨材の混合物の実積率が減少することが指摘されている。そのため, 繊維補強ポーラスコンクリートの配合設計においては, 通常の繊維補強コンクリートと同様に混入繊維分の体積を粗骨材体積の一部に置換するのではなく, 繊維と粗骨材の混合物の実積率を配合計算に用いることが合理的とされる。

図-2 に孟宗竹繊維と粗骨材の混合物の実積率と繊維量の関係を示す。なお, 図中の破線は, 切片 56.2 として全てのプロットで直線回帰したものである。齋藤・出村の研究^{5) 6)}と同様に, 孟宗竹繊維を用いた場合でも, 繊維量が増加すると, 繊維と粗骨材の混合物の実積率が減少することが分かる。繊維量が 1% 増加すると, 孟宗竹繊維と粗骨材の混合物の実積率は 1.7% 減少する結果となった。また, 実積率に与える孟宗竹繊維の含水状態の影響はほとんどないことが分かる。これらのことから, 本研究における配合設計では, 繊維と粗骨材の混合物の実積率を計算に用いた。

表-1 に配合を示す。本研究では, 水セメント比 20% および空隙率 15% の条件でペーストをバインダーとするポーラスコンクリートを基準とし, 異なる含水状態の孟宗竹繊維量 Vf を 1%, 2% および 3% とした繊維補強ポーラスコンクリートをそれぞれ作製し, 繊維量および含水状態が硬化物性に与える影響について検討した。なお,

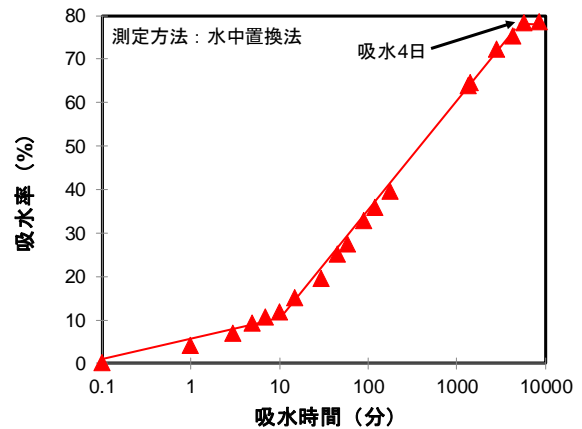


図-1 孟宗竹繊維の吸水特性

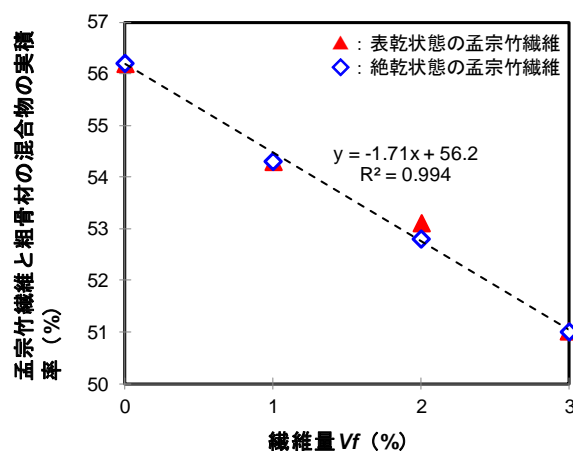


図-2 孟宗竹繊維と粗骨材の混合物の実積率を繊維量の関係

ペーストおよび繊維混入ペーストは, 予備試験でテーパーパイププレートによる振動締め固め状況の確認を行い, ペーストのダレ(振動によってペーストが空隙を埋めること)が生じない流動性として JIS フロー140mm となる混和剤量を決定した。また, 絶乾状態の孟宗竹繊維を用い

表-1 配合

水セメント比 W/C (%)	空隙率 (%)	繊維の 含水状態	繊維量 Vf (%)	単位量 (kg/m ³)				含水状態に よる補正水 ΔW	
				水 W	セメント C	粗骨材 G	孟宗竹繊維 Bf		
20	15	-	0	111	557	1478	0	0	
			表乾状態	1	111	557	1428	11.9	0
				2	111	557	1397	23.8	0
		絶乾状態	3	111	557	1341	35.7	0	
			1	111	557	1428	6.7	5.2	
			2	111	557	1397	13.4	10.4	
			3	111	557	1341	20.1	15.6	

混和剤量: プレーンペーストおよび繊維混入ペーストの JIS フローが 140mm となるよう, C×0.6~1.2% の範囲で使用

る配合の補正水は、粗骨材の含水状態による補正の考え方を参考に、練混ぜ終了時点では表乾状態には至らないが、孟宗竹繊維の吸水率分の水量とした。

2.3 練混ぜおよび供試体作製

練混ぜは容量50Lのパン型ミキサーを用いて室温20℃の環境下で水以外の材料を空練り15秒間行い、注水後本練りを4分間行った。孟宗竹繊維の混入タイミングは注水時とした。孟宗竹繊維の吸水特性は、図-1のとおり、絶乾状態のものを4日吸水させることで飽水することができる。このことを応用し、1バッチ当たりの水量と飽水させるために必要な水量を合計した水に絶乾状態の繊維を浸漬することで表乾状態の孟宗竹繊維が含まれる水を予め準備し、表乾状態の孟宗竹繊維を含む配合で用いた。

供試体は、JCI-SPO1-1「ポーラスコンクリートの供試体の作り方(案)」⁷⁾に準拠し、テーブルバイブレータにより振動締固めを行い、φ100×200mmの円柱供試体および100×100×400mmの角柱供試体を作製した。供試体は、材齢1日で脱型し、材齢28日まで標準養生を行った。次節で示す試験で用いる供試体は、共通して材齢28日である。

2.3 試験方法

(1) 空隙率

空隙率試験は、JCI-SPO2-1「ポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)」⁷⁾に準拠して、φ100×200mmの円柱供試体を用いて全空隙率および連続空隙率を測定した。全空隙率および連続空隙率はそれぞれの配合で3本の平均値を算出した。

(2) 透水性

透水性試験は、JCI-SPO3-1「ポーラスコンクリートの透水性試験方法(案)」⁷⁾に準拠して、φ100×200mmの円柱供試体を用いて室温20℃の環境下で水頭差20cmの透水時間を計測し、透水係数を算出した。透水係数はそれぞれの配合で3本の平均値を算出した。

(3) 圧縮強度

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して、圧縮荷重を測定した。圧縮強度は、最大圧縮荷重を用いて、それぞれの配合で3本の平均値を算出した。なお、供試体に載荷板が接する面にはキャッピングを施した。

(4) 曲げ強度および曲げタフネス

曲げ強度および曲げタフネス試験は、JCI-SF4「繊維補強コンクリートの曲げ強度及び曲げタフネス試験方法」⁷⁾に準拠して、曲げ荷重と供試体中央部のたわみを測定した。曲げ強度は最大曲げ荷重を用いて算出した。曲げタフネスはたわみ2mmまで(これに満たないものは、最大曲げ荷重時のたわみ量まで)の荷重-たわみ関係の面

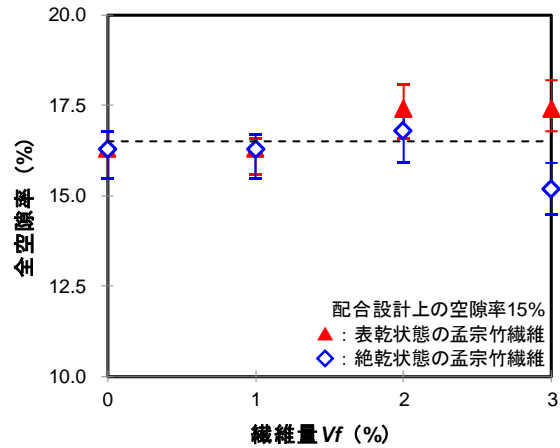


図-3 全空隙率と繊維量の関係

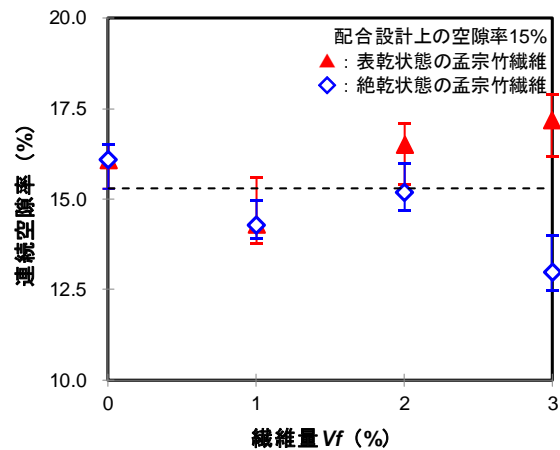


図-4 連続空隙率と繊維量の関係

積を用いて算出した。なお、それぞれの値は、各配合で3本の平均値を算出した。

(5) 骨材の飛散抵抗性

骨材の飛散抵抗性試験は、舗装試験方法便覧別冊「カンタプロ試験方法」に準拠して、φ100×200mmの円柱供試体からφ100×63.5mmに切断した供試体を用いて、試験前後の供試体の質量を測定した。飛散抵抗性の評価は質量損失率とした。質量損失率は、試験前後の供試体の質量差を試験前の供試体の質量で除した値の百分率を求め、それぞれの配合で3本の平均値を算出した。

3. 実験結果および考察

3.1 孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの空隙率

図-3に全空隙率の測定結果を示す。なお、図中の破線は、全てのプロットの平均値を参考として示した。の測定結果は15.2~17.4%となり、配合設計上の空隙率15%の±2.5%以内の範囲となり、概ね配合設計通りの空隙率が実現できていることが分かる。また、孟宗竹繊維の含水状態が全空隙率に与える影響はほとんどない。

図-4 に連続空隙率の測定結果を示す。なお、図中の破線は、全てのプロットの平均値を参考として示した。測定結果は13.0～17.2%となり、全空隙率より最大で2%程度小さくなる傾向であった。また、孟宗竹繊維の含水状態が全空隙率に与える影響はほとんどない。

以上より、齋藤・出村による研究^{5) 6)}を参考に、繊維と粗骨材の混合物の実積率を配合計算に用いることで、目標とする空隙率が得られると言える。

3.2 孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの透水性

図-5 に透水性試験の結果を示す。なお、図中の破線は、全てのプロットの平均値を参考として示した。繊維量および含水状態によらず、ほぼ一定の透水係数であることが分かる。なお、透水性舗装等で求められる性能である透水係数0.01cm/secを全ての配合で十分に上回る結果であった。

3.3 孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度

図-6 に圧縮強度と孟宗竹繊維量 Vf の関係を示す。なお、図中の破線は、切片18.9として全てのプロットで直線回帰したものである。繊維の含水状態によらず、繊維量が増加すると圧縮強度が減少する傾向であることが分かる。また、すべてのプロットで線形回帰することで、繊維量が1%増加することで圧縮強度は約2.6%低下する結果となった。既報⁴⁾において、同じ配合条件のポーラスコンクリートの粗骨材部分を除いて、孟宗竹繊維を混入したセメントペーストの材齢7日圧縮強度と繊維量の関係は、含水状態によらず、繊維量が1%増加することで圧縮強度が23%低下することがわかっている。異なる試験材齢ではあるが、圧縮強度の低下率はポーラスコンクリートとペーストで概ね10倍異なっていた。孟宗竹繊維を混入したセメントペーストと同様に、ポーラスコンクリートにおいても、孟宗竹繊維に起因する有効断面の減少によって圧縮強度が低下するものと考えられる。

3.4 孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度および曲げタフネス

図-7 に曲げ強度と孟宗竹繊維量 Vf の関係を示す。繊維の含水状態によって、曲げ強度と繊維量の関係性が異なることが分かる。絶乾状態の孟宗竹繊維を用いた配合では、繊維量が増加すると曲げ強度が線形的に若干増加する傾向である。それに対して、表乾状態の孟宗竹繊維を用いた配合では、繊維量が1%以上となるとほぼ一定の曲げ強度となり、プレーンよりも小さい値を示す傾向であった。既報⁴⁾において、練混ぜ時の孟宗竹繊維とセメントペーストの間で生じる水分移動が硬化ペーストの圧縮強度に与える影響はほとんどないことがわかっている。そのため、繊維の含水状態の違いが曲げ強度に与える影響が異なった理由は、表乾状態の孟宗竹繊維を用いたポーラスコンクリートでは、硬化後に孟宗竹繊維に含

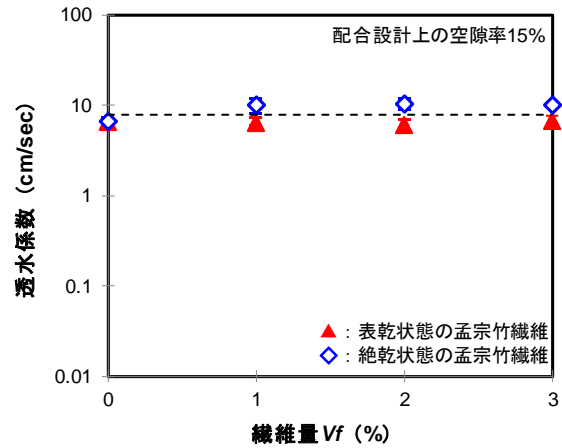


図-5 透水性と繊維量の関係

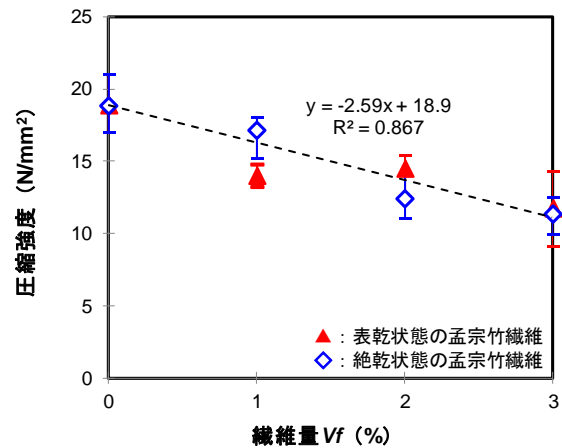


図-6 圧縮強度と繊維量の関係

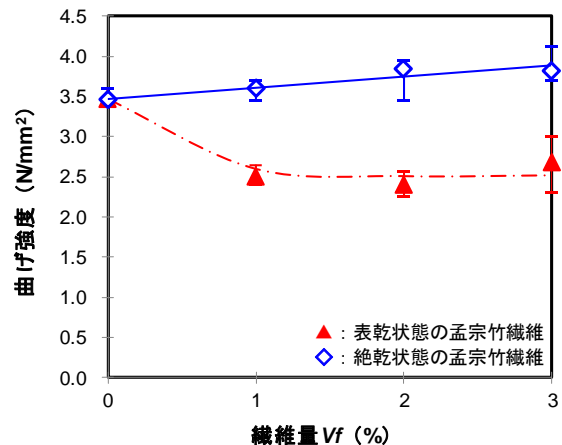


図-7 曲げ強度と繊維量の関係

まれていた水分が周囲のペーストの養生水として消費されることで、孟宗竹繊維の体積が減少し、繊維とペーストの付着性(架橋効果)が低下した結果であると考えられる。一方、絶乾状態の孟宗竹繊維を用いたポーラスコンクリートでは、孟宗竹繊維の毛細管に練混ぜ時からセ

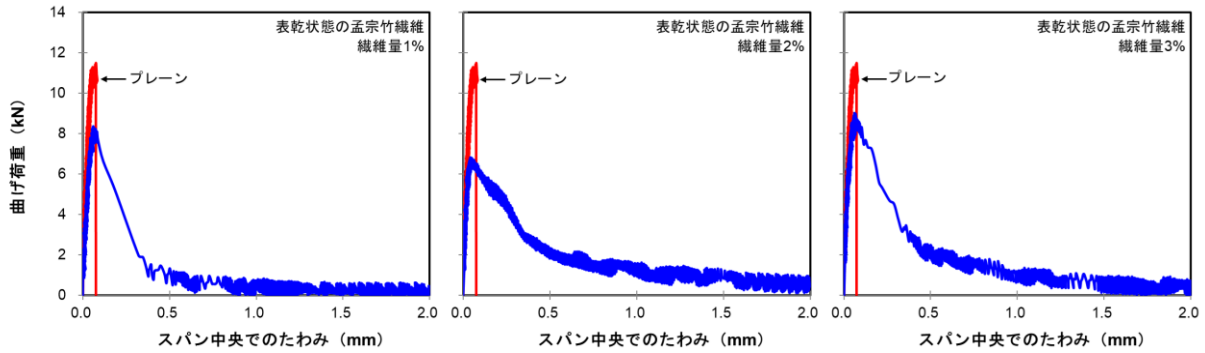


図-8 表乾状態の孟宗竹繊維を用いた配合の繊維量別の曲げ荷重とたわみの関係（一例）

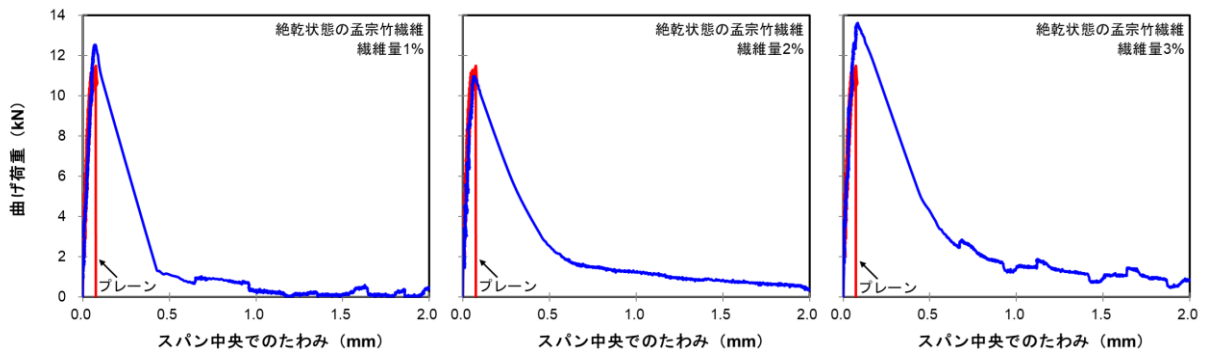


図-9 絶乾状態の孟宗竹繊維を用いた配合の繊維量別の曲げ荷重とたわみの関係（一例）

メントペーストが入ることで、繊維とペーストの附着性（架橋効果）が向上した結果であると考えられる。なお、透水性舗装等で求められる性能である曲げ強度 4.5N/mm^2 を全ての配合で下回る結果であった。

図-8 に表乾状態の孟宗竹繊維を用いた配合の繊維量別の曲げ荷重とたわみの関係の一例を、図-9 に絶乾状態の孟宗竹繊維を用いた配合の繊維量別の曲げ荷重とたわみの関係の一例をそれぞれ示す。なお、図中には、参考としてプレーンの配合の結果も示している。いずれの図においても、プレーンとは異なり、繊維の架橋によって脆性的な破壊を生じていないことが分かる。また、繊維量が増加することで架橋による耐荷力が増し、スパン中央でのたわみ 0.5mm 以降の曲げ荷重が増加する傾向であるように見える。

図-10 に曲げタフネスと孟宗竹繊維量 V_f の関係を示す。繊維の含水状態によらず、繊維量が増加すると、曲げタフネスが増加することが分かる。また、絶乾状態の孟宗竹繊維を用いた配合の方が表乾状態の繊維を用いた配合よりも、曲げタフネスが大きいことが分かる。プレーンを基準として、表乾状態の孟宗竹繊維による曲げタフネスの増分は、繊維量 1%、2%および 3%で、それぞれ 4.5 倍、6.8 倍および 7.3 倍となった。それに対して、絶乾状態の孟宗竹繊維による曲げタフネスの増分は、繊維量 1%、2%および 3%で、それぞれ 7.4 倍、9.5 倍および

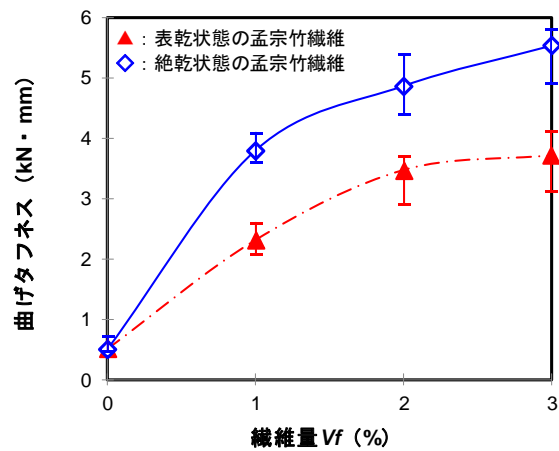


図-10 曲げタフネスと繊維量の関係

び 11 倍となった。繊維の含水状態の違いが曲げタフネスに与える影響が異なった理由は、曲げ強度と同様であると考えられる。

3.5 孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの骨材の飛散抵抗性

図-11 に骨材の飛散抵抗性試験の結果を示す。繊維量および含水状態によらず、ほぼ一定の質量損失率であることが分かる。なお、透水性舗装等で求められる性能である質量損失率 20%以下を全ての配合で満足する結果であった。

4. まとめ

孟宗竹繊維の含水状態および混入量に着目して、目標空隙率15%に設定した孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの基本的な各種性能に関する評価を行った。本論文で得た結果を以下にまとめる。

- (1) 孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートは、孟宗竹繊維と粗骨材の混合物の実積率を配合計算に用いることで目標とする空隙率を実現できる。
- (2) 孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの透水性および骨材の飛散抵抗性は、繊維量および含水状態の影響をほとんど受けない。
- (3) 孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの圧縮強度は、繊維の含水状態によらず、繊維量が増加すると低下する傾向である。
- (4) 孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの曲げ強度は、絶乾状態の繊維では、繊維量が増加すると曲げ強度が線形的に若干増加する傾向である。また、表乾状態の繊維では、繊維量が1%以上となるとほぼ一定の曲げ強度となり、プレーンよりも小さい値を示す。
- (5) 孟宗竹繊維補強ポーラスコンクリートの曲げタフネスは、表乾状態の繊維よりも絶乾状態の繊維を用いる方が大きい傾向である。また、繊維の含水状態によらず、繊維量に伴って曲げタフネスは増加する傾向である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP19K15065 の助成を受けたものである。また、使用した孟宗竹繊維は株式会社国元商会鹿児島工場から提供を受けた。記して謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 鳥居厚志, 奥田史郎: タケは里山の厄介者か?, 森林科学, 第 58 巻, pp.2-5, 2010.
- 2) 寺井雅和: 竹繊維形状が繊維補強セメント複合材料の強度物性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論

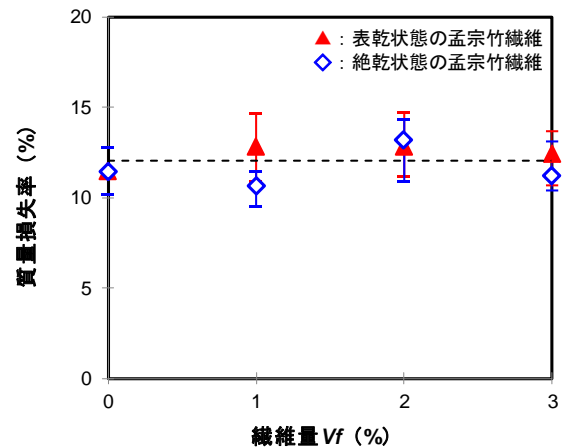


図-11 骨材の飛散抵抗性

文集, Vol.36, No.1, pp.322-327, 2014.7

- 3) 遠藤典男, 猪瀬大幸, 大山彩香, 小林清, 丸山健太郎: 竹片を混合したポーラスコンクリートの力学的特性, 長野工業高等専門学校紀要第 46 号, pp.1-5, 2012.
- 4) 山田宏, 関友則, 小堺規行: 孟宗竹繊維の含水状態がセメントペーストの流動性および圧縮強度に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1469-1474, 2019.7
- 5) 齋藤利克, 出村克宣: ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの基礎的性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.247-252, 2005.7
- 6) 齋藤利克, 出村克宣: ビニロン繊維補強ポーラスコンクリートの調合設計法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 657 号, pp.1947-1953, 2010.11
- 7) 日本コンクリート工学協会: JCI 基準集 1977-2002 年度, 2004.4.