

論文 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

山田 宏*1・関 友則*2・小塚 規行*3

要旨： 地域資源である孟宗竹の有効活用としてポーラスコンクリートへの適用を想定している。本論文ではその基礎的検討としてポーラスコンクリートのバインダーに着目して、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を検討した。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を明らかにした。ペーストの流動性は孟宗竹の含水率 30%程度を境に増減することを明らかにした。また、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。

キーワード： 孟宗竹繊維, 含水率, セメントペースト, 流動性, 圧縮強度

1. はじめに

西日本を中心に放置竹林による竹害（他植生を侵食、土砂災害誘発）が問題 となっている。鹿児島県の竹林面積は約 16 千ヘクタール（国内 1 位）で、孟宗竹がその大半を占める。孟宗竹林の多くは民有林であるが、現在では、竹を効率的に回収するシステムが薩摩川内市などで試行されており、地域資源確保と地域環境問題の解決に向けて行政が主導的役割を果たしている。

孟宗竹の特徴は、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%の高い吸水率と、その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。従来から竹筋コンクリートとして孟宗竹の利用が進められているが、近年では孟宗竹繊維をコンクリートやポーラスコンクリート（以下、PoC）に用いる試み^{1) 2)}がなされている。これらの試みは孟宗竹繊維の含水状態を一定とした条件で、主に孟宗竹の高い引張強度に着目した検討である。しかし、孟宗竹の吸水率は 70%~80%と高く、コンクリートや PoC のフレッシュ性状や硬化物性に影響を与える恐れがある。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の低い PoC については、わずかな水量の変化で大きく流動性が異なる。生育も速く定常的な資源になり得る孟宗竹の利用用途の拡大を図るためには、セメント系複合材料の各種性能に与える孟宗竹の含水分の影響を把握することが必要不可欠である。

本研究では、PoC のバインダーとなるセメントペーストを対象として、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について基礎的な検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料は普通ポルトランドセメント（略号：C，密

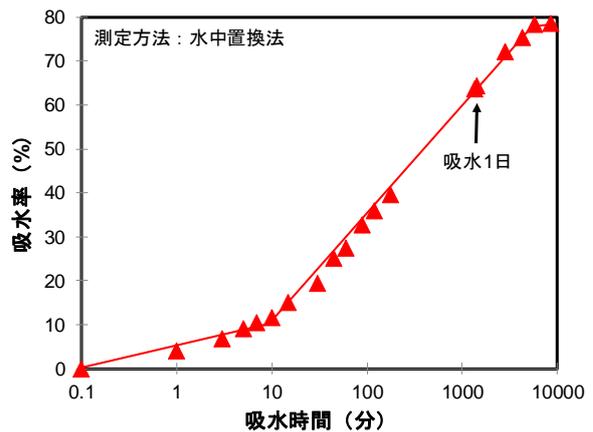


図-1 孟宗竹繊維の吸水特性



写真-1 孟宗竹繊維の外観

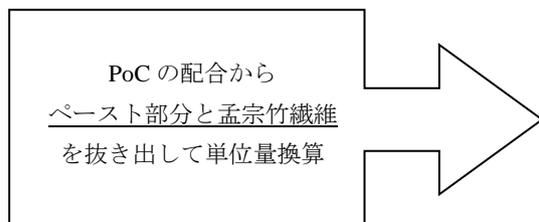
*1 鹿児島工業高等専門学校 都市環境デザイン工学科准教授 博士（工学）（正会員）

*2 住友大阪セメント株式会社 建材事業部 技術グループ 博士（工学）（正会員）

*3 住友大阪セメント株式会社 執行役員 建材事業部長

表-1 配合

水セメント比 W/C (%)	空隙率 (%)	繊維量 Vf (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水 W	セメント C	粗骨材 G	孟宗竹繊維 Bf	混和剤 SP
20	15	1	116	580	1447	6.70~11.9	11.6
20	15	2	116	580	1420	13.4~23.8	11.6
20	15	3	116	580	1394	20.1~35.7	11.6



単位量 (kg/m ³)			
水 W	セメント C	孟宗竹繊維 Bf	混和剤 SP
374	1870	21.6~38.4	37.4
362	1812	41.9~74.4	36.2
351	1757	60.9~108	35.1

度 3.15g/cm³), ポリカルボン酸系高性能減水剤 (略号: SP, 密度 1.06g/cm³), 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状の繊維 (略号: Bf, 繊維長 30mm, 表乾密度 1.19g/cm³, 吸水率 77.6%, 吸水特性: 図-1 参照, 外観: 写真-1 参照) を用いた。なお, 孟宗竹繊維の表乾状態の判定は, 粗骨材の表乾状態の判定方法を参考にし, 孟宗竹繊維の表面水分をウェスで除去した直後の状態とし, 水分が手に残らないように調整した。

繊維量 1%, 2% および 3% としたポーラスコンクリート (水セメント比 20%, 空隙率 15%) のバインダーであるペースト部分と繊維を抜き出した配合 (表-1) を検討に用いた。なお, 配合計算に用いた粗骨材 (略号: G, 表乾密度 2.68g/cm³, 実績率 55.0%) は 6 号砕石である。

練混ぜはホバート型ミキサを用いて室温 20°C の環境下で合計 4 分間とした。孟宗竹繊維の混入タイミングは練混ぜ開始直後とした。

2.2 試験方法

(1) 流動性

流動性試験は, 練上がり直後のペーストに対して, JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」に示されるフローおよびウェットスクリーニングで孟宗竹繊維を除去したペーストのフローを測定した。

(2) 圧縮強度

供試体はφ50×100mmの円柱形とし, 気泡を十分に追いつくために, テーブルバイブレーターを用いて 120 秒間の振動締固めを行い作製した。円柱供試体は材齢 1 日で脱型し, 材齢 7 日まで室温 20°C の環境下で型枠内封蔵養生を行った後に, JSCE-G 505 「円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法」に準拠して圧縮強度試験を行った。なお, ペーストの圧縮強度はそれぞれ 5 体の平均値を算出した。

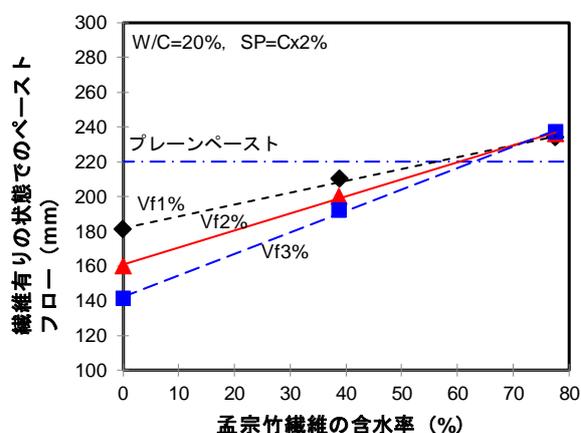


図-2 繊維有りの状態でのペーストフローと孟宗竹繊維の含水率の関係

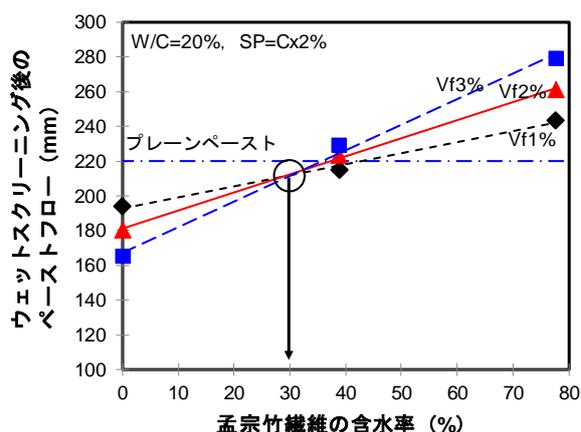


図-3 ウェットスクリーニング後のペーストフローと孟宗竹繊維の含水率の関係

3. 実験結果および考察

3.1 孟宗竹繊維の含水率がペーストフローに与える影響

異なる含水率の孟宗竹繊維がペーストの流動性に与える

る影響を検討した。図-2 に繊維有りの状態でのペーストフローと孟宗竹繊維の含水率の関係を示す。図中には繊維を混入していないプレーンのペーストフローの結果(220mm)を一点鎖線で参考を示している。表乾状態(含水率 77.6%)と絶乾状態(含水率 0%)の孟宗竹繊維を用いたペーストフローの差は、繊維量 1%, 2%および 3%でそれぞれ 53mm, 76mm および 96mm であった。孟宗竹繊維を用いたペーストフローは繊維量が多くなるに従い傾きが大きくなり、含水率の影響を受けやすくなる傾向となった。表乾状態(含水率 77.6%)の孟宗竹繊維を用いた繊維量 1%, 2%および 3%のペーストのフローはそれぞれ 234mm, 236mm および 237mm であり、大きな差は現れなかったものの、プレーンペーストのフローよりも大きいものであった。これは繊維量が多くなることでペーストの変形を拘束する効果と表乾状態の繊維からペースト中に水分移動した影響による効果が概ね一致した結果であると考えられる。また、絶乾状態(含水率 0%)の孟宗竹繊維を用いた繊維量 1%, 2%および 3%のペーストのフローは、それぞれ 181mm, 160mm および 141mm であった。これは繊維量が多くなることでペーストの変形を拘束する効果が大きくなったことと、乾燥した繊維がペースト中の水分を吸収してフローを低下させた結果であると考えられる。

孟宗竹繊維とペーストとの間で水分が移動することがペーストの流動性に影響を与える一つの原因であると考えられるため、その影響程度を捉えるために繊維を除去したペーストフローと孟宗竹繊維の含水率の関係を検討した。図-3 にウェットスクリーニング後のペーストフローと孟宗竹繊維の含水率の関係を示す。繊維有りの状態でのペーストフローに比べて全体的にフローが大きい傾向であり、孟宗竹繊維の含水分の影響が鮮明に表れた。表乾状態(含水率 77.6%)と絶乾状態(含水率 0%)で生じるウェットスクリーニング後のペーストフローの差は、繊維量 1%, 2%および 3%でそれぞれ 40mm, 81mm および 114mm であった。ウェットスクリーニング後のペーストフローは繊維量が多くなるに従って、傾きが大きくなり、含水率の影響を受けやすくなる傾向となった。表乾状態(含水率 77.6%)の孟宗竹繊維を用いた繊維量 1%, 2%および 3%のウェットスクリーニング後のペーストのフローはそれぞれ 243mm, 261mm および 279mm であった。繊維量が多いほど、ペーストに移動する繊維の含水分が多くなることで、フローが大きくなると考えられる。一方、絶乾状態(含水率 0%)の孟宗竹繊維を用いた繊維量 1%, 2%および 3%のウェットスクリーニング後のペーストのフローは、それぞれ 194mm, 180mm および 165mm であった。繊維量が多いほど、繊維に移動するペーストの水分が多くなることで、フローが小さく

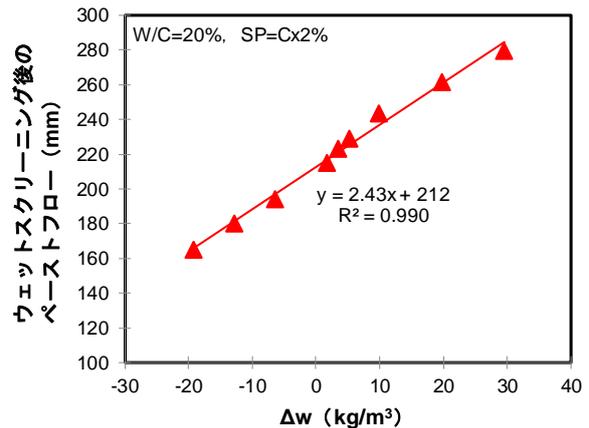


図-4 ウェットスクリーニング後のペーストのフローと Δw の関係

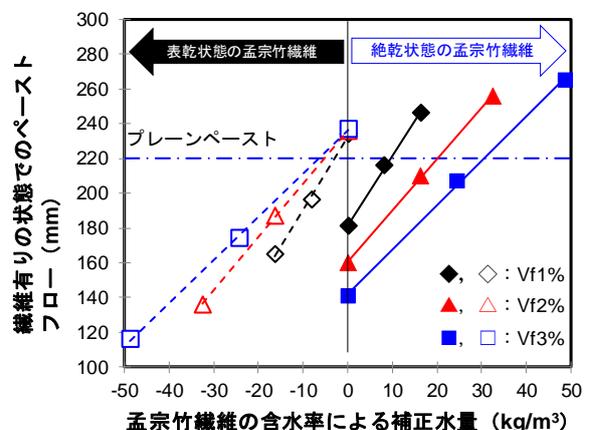


図-5 繊維有りの状態でのペーストフローと孟宗竹繊維の含水率による補正水量の関係

なると考えられる。また、それぞれの近似直線の交点は、いずれの組合せも孟宗竹繊維の含水率 30%程度となった。この含水率は一般的な木材の繊維飽和点⁴⁾(細胞壁内の結合水が最大となる含水率)と概ね一致している。ペーストの水分が孟宗竹繊維に取り込まれることによるフローの減少と、孟宗竹繊維中の自由水がペーストに取り込まれることによるフローの増大が、含水率 30%程度を境に切り替わることを意味しているものと考えられる。

図-4 にウェットスクリーニング後のペーストのフローと孟宗竹繊維の含水率 30%を基準とした場合の繊維の含水量 Δw の関係を示す。ウェットスクリーニング後のペーストフローと Δw の関係は線形関係が成り立つことが確認できる。このことから、含水率 30%を基準としたときの含水量を算出することでペースト自体の流動性を予測することができる。

3.2 孟宗竹繊維を用いたペーストの繊維含水分による水量の補正

孟宗竹繊維の含水率によってペーストの流動性に与える影響が大きいことを示した。ここでは孟宗竹繊維の含

水状態を考慮して配合の修正が可能かどうか、一般的なコンクリートの配合で粗骨材の含水率などから現場配合に修正する方法を参考に検討した。

絶乾状態（含水率 0%）の孟宗竹繊維を用いたペーストに吸水率分までの補正水量を加えたケースと表乾状態（含水率 77.6%）の孟宗竹繊維を用いたペーストから吸水率分までの補正水量を減じたケースで検討を行った。

図-5 に繊維有りの状態でのペーストフローと孟宗竹繊維の含水率による補正水量の関係を示す。まず図の右側に着目する。いずれの繊維量においても、補正水量が多くなるに従い、繊維有りの状態でのペーストフローは大きくなる傾向となった。また、それぞれの繊維量で最大の水量補正（孟宗竹繊維の吸水率分の補正）を行った表乾状態相当の繊維量 1%、2%および 3%のペーストのフローは、それぞれ 246mm、256mm および 265mm であった。この結果は図中白抜きの補正水量 0kg/m³ である補正水量なしの表乾状態のペーストフローと一致しておらず、その差は繊維量 1%、2%および 3%で、それぞれ 12mm、20mm および 28mm であった。次に図の左側に着目する。いずれの繊維量においても、減じる補正水量が多くなるに従い、繊維有りの状態でのペーストフローは小さくなる傾向となった。また、それぞれの繊維量で最大の水量補正（孟宗竹繊維の吸水率分の補正）を行った絶乾状態相当の繊維量 1%、2%および 3%のペーストのフローは、それぞれ 165mm、136mm および 116mm であった。この結果は図中塗りつぶしの補正水量 0kg/m³ である補正水量なしの絶乾状態のペーストフローと一致しておらず、その差は繊維量 1%、2%および 3%で、それぞれ 16mm、24mm および 25mm であった。

繊維の拘束によって流動性の違いを十分に捉えることができていないため、繊維を除去したペーストフローと孟宗竹繊維の含水率による補正水量の関係を検討した。図-6 にウェットスクリーニング後のペーストフローと孟宗竹繊維の含水率による補正水量の関係を示す。まず図の右側に着目する。いずれの繊維量においても、補正水量が多くなるに従い、ウェットスクリーニング後のペーストフローは大きくなる傾向となった。また、それぞれの繊維量で最大の水量補正（孟宗竹繊維の吸水率分の補正）を行った表乾状態相当の繊維量 1%、2%および 3%のウェットスクリーニング後のペーストのフローは、それぞれ 260mm、284mm および 298mm であった。この結果は図中白抜きの補正水量 0kg/m³ である補正水量なしの表乾状態のペーストフローと一致しておらず、その差は繊維量 1%、2%および 3%で、それぞれ 17mm、23mm および 19mm であった。次に図の左側に着目する。いずれの繊維量においても、減じる補正水量が多くなるに従い、ウェットスクリーニング後のペーストフローは小さ

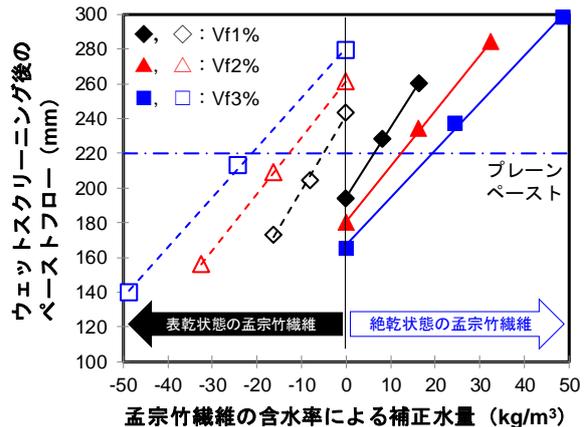


図-6 ウェットスクリーニング後のペーストフローと孟宗竹繊維の含水率による補正水量の関係

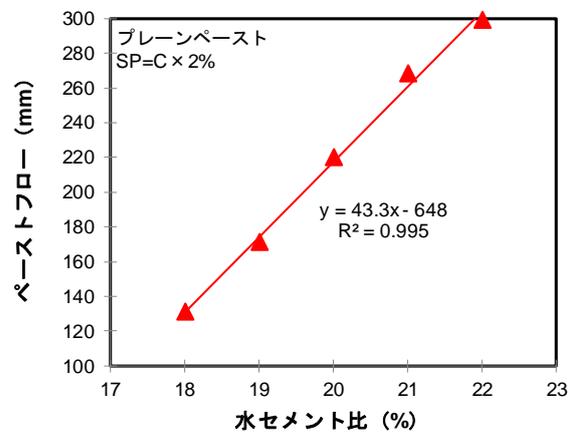


図-7 ペーストフローと水セメント比の関係

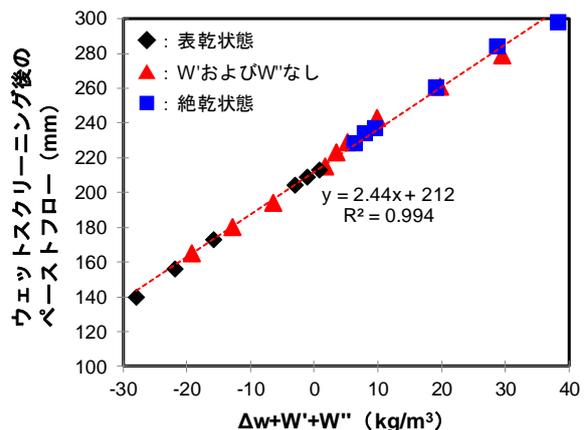


図-8 ウェットスクリーニング後のペーストのフローと $\Delta w+W'+W''$ の関係

くなる傾向となった。また、それぞれの繊維量で最大の水量補正（孟宗竹繊維の吸水率分の補正）を行った絶乾状態相当の繊維量 1%、2%および 3%のウェットスクリーニング後のペーストのフローは、それぞれ 173mm、156mm および 140mm であった。この結果は図中塗りつぶしの補正水量 0kg/m³ である補正水量なしの絶乾状態

のペーストフローと一致しておらず、その差は繊維量1%、2%および3%で、それぞれ21mm、24mmおよび25mmであった。それぞれの繊維量で最大の水量補正（孟宗竹繊維の吸水率分の補正）を行うことで絶乾状態（含水率0%）と同じ水量になるが、同じ水分条件でペーストフローの最大の差は繊維量1%、2%および3%で同様にいずれも20mm程度となった。

同じ水分条件でも20mm程度のフローの差が生じるのは、孟宗竹繊維とペーストとの間で水分が移動することよりも練混ぜ当初に加える補正水量の影響を強く受けているためと考えられる。そこで、プレーンのペーストで水セメント比がフローに与える影響を確認した。図-7にペーストフローと水セメント比の関係を示す。20mmのフローの差が生じる水セメント比は、概ね0.5%であった。プレーンペーストの結果に基づき、水セメント比0.5%分の水分を繊維量1%、2%および3%の配合でそれぞれ求めると、9.35kg/m³、9.06kg/m³および8.79kg/m³となった。

水量補正をしていない孟宗竹繊維を用いたペーストの流動性は含水率30%程度を境にフローの増減が切り替わるため、孟宗竹繊維の含水率30%を基準とした繊維の含水量 Δw と、孟宗竹繊維の含水率による補正水量 W' および補正水量による初期の水セメント比の相違分の水量 W'' を加えた合計の水量でウェットスクリーニング後のペーストのフローを検討した。図-8にウェットスクリーニング後のペーストのフローと $\Delta w + W' + W''$ の関係を示す。ウェットスクリーニング後のペーストフローと $\Delta w + W' + W''$ の関係は線形関係が成り立つことが確認できる。このことから、含水率30%を基準としたときの含水量と、孟宗竹繊維の含水率による補正水量および補正水量による初期の水セメント比の相違分の水量を算出することでペースト自体の流動性を予測することが可能となり、孟宗竹繊維の含水状態を考慮して流動性に着目した配合の修正が可能といえる。

3.3 孟宗竹繊維を用いたペーストの圧縮強度

異なる含水率の孟宗竹繊維がペーストの圧縮強度に与える影響を検討した。水セメント比が20%と低いため、なるべく早期の材齢で、かつ、孟宗竹の含水率の影響を捉えるために、封緘養生後の材齢7日の圧縮強度で評価した。図-9に材齢7日圧縮強度と孟宗竹繊維量 V_f の関係を示す。繊維量が1%増加するすると、孟宗竹繊維を用いたペーストの圧縮強度はプレーンに比べて23%低下する結果となった。また、含水状態の違いによる圧縮強度の明確な差は確認されなかった。吸水率が高い孟宗竹繊維に起因する有効断面の欠損によって、圧縮強度が低下するものと考えられる。

孟宗竹繊維とペーストとの間で水分が移動すること

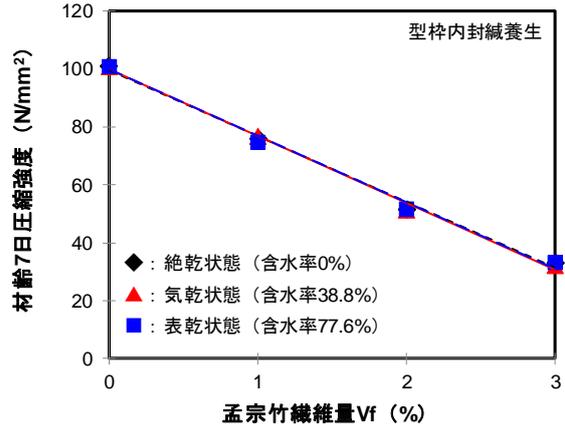


図-9 材齢7日圧縮強度と孟宗竹繊維量 V_f の関係

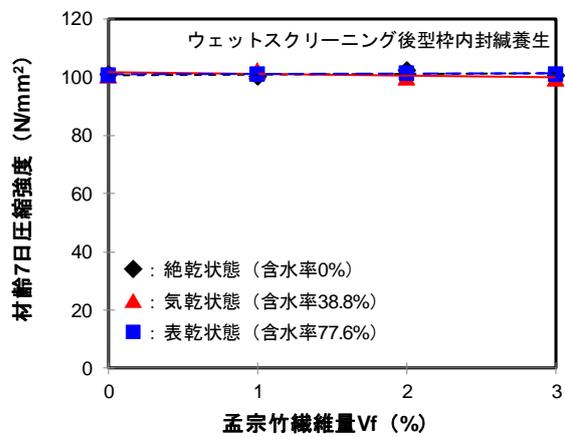


図-10 ウェットスクリーニング後のペーストの材齢7日圧縮強度と孟宗竹繊維量 V_f の関係

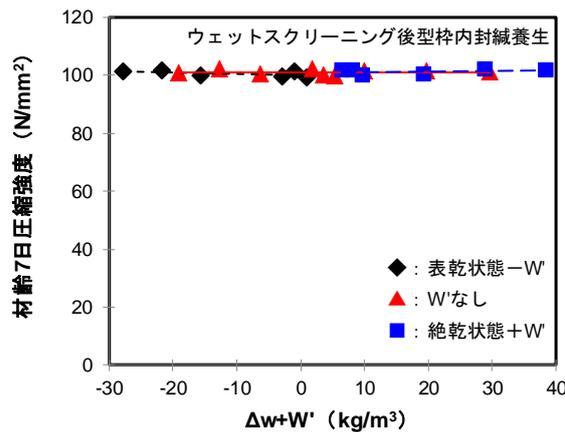


図-11 ウェットスクリーニング後のペーストの材齢7日圧縮強度と孟宗竹繊維の含水率による補正水量の関係

でペーストの流動性に影響を与えていることを前節までで示したが、圧縮強度においても繊維を除去したペーストで検討した。図-10にウェットスクリーニング後のペーストの材齢7日圧縮強度と孟宗竹繊維量 V_f の関係を示す。ウェットスクリーニング後のペーストの材齢7日圧

縮強度は孟宗竹繊維の含水状態による影響をほとんど受けておらず、いずれの繊維量においてもプレーンペーストの圧縮強度とほとんど変わらなかった。理由は明確ではないが、これはウェットスクリーニング完了までの時間での孟宗竹繊維とペースト間での水分移動の量が、ポリカルボン酸系高性能減水剤を用いたペーストのフローには鋭敏に働く量であったと考えられるのに対して、硬化後の強度に影響を与えるほどの量ではなかったと考えられる。この結果に関しては、実際に移動した水分量などを特定するための更なる検討を要する。

孟宗竹繊維の含水状態を考慮して配合の修正を行ったケースでのペーストにおいても圧縮強度に変化がないかどうか確認した。図-11 にウェットスクリーニング後のペーストの材齢 7 日圧縮強度と孟宗竹繊維の含水率による補正水量の関係を示す。ウェットスクリーニング後のペーストの材齢 7 日圧縮強度は孟宗竹繊維の含水率による補正水量の影響をほとんど受けておらず、いずれの含水状態においてもプレーンペーストの圧縮強度とほとんど変わらなかった。

以上のことから、孟宗竹繊維の含水状態はウェットスクリーニング後のセメントペーストの流動性には大きな影響を与えるのに対して、圧縮強度にはほとんど影響しないことが明らかになった。

今回は、ペーストに着目した検討を実施したが、実際に道路材料などで用いられる PoC での検討が必要であり、今回の結果と PoC の施工性や耐久性との関係について、今後更なる検討を行う予定である。

4. まとめ

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について基礎的な検討を行った。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。

- (2) ペーストの水分が孟宗竹繊維に取り込まれることによるフローの減少と、孟宗竹繊維中の自由水がペーストに取り込まれることによるフローの増大は、孟宗竹の含水率 30%程度を境に切り替わると考えられる。
- (3) 流動性に着目した配合は、孟宗竹繊維の含水状態や練混ぜ時の水量の増減を考慮することで修正することができる。
- (4) 孟宗竹繊維を用いたペーストの圧縮強度は含水状態による影響はほとんどないものの、繊維量が多くなるほど低下する傾向があった。また、繊維を除去したペーストの圧縮強度は、含水状態および繊維量の影響を受けることなく、ほぼ一定の値となった。

謝辞

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。記して謝意を表する次第である。

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) 福島和彦, 船田良, 杉山敦司, 高部圭司, 梅沢俊明, 山本浩之編: 木質の形成(第 2 版), 海青社, pp.487-489, 2011.