

論文 繊維補強コンクリートの配合設計法に対する余剰ペースト理論の適用性に関する基礎的研究

中道 優太*1・上田 尚史*2

要旨：繊維補強コンクリートの合理的な配合設計を目標に、普通コンクリートの配合設計の一つである余剰ペースト理論を繊維補強コンクリートへの適用性について検討した。繊維を同一体積および同一表面積の球と仮定し、繊維混入率 0.5~1.5vol%，単位水量 180kg/m³~220kg/m³ の範囲内において、実積率試験を行い、実積率が最大となる細骨材率でペースト膜厚粒径比が最大となることを確認した。また、ペースト膜厚粒径比が最大となる細骨材率付近において流動性が最大となることを明らかにした。このことから、余剰ペースト理論は繊維補強コンクリートに対しても適用可能であることを示した。

キーワード：繊維補強コンクリート、配合設計、余剰ペースト理論、PVA 繊維、流動性

1. はじめに

近年、多種多様な繊維補強セメント複合材料（以下、FRCC）が開発されており、構造部材としての利用拡大も期待されている。構造部材として利用するためには、フレッシュ時のワーカビリティを確保することは必須であり、対象や目的に応じて適切に配合設計することが望まれる。しかし、FRCC の配合設計法については必ずしも明確になっておらず、現在のところ、各機関の独自の技術や知見に依存するところが大きい。

現在、繊維補強コンクリート（以下、FRC）の配合設計法としては、「鋼繊維補強コンクリートの設計施工指針（案）」¹⁾がある。本指針（案）では、繊維混入率の増減や水セメント比の増減などに対して、細骨材率と単位水量の補正方法が示されている。しかし、配合の修正方法の理論的な根拠は示されていないとともに、対象が長さ 30mm 程度の鋼繊維を使用した FRC であるため、異なる繊維種類や繊維長（アスペクト比）に対する適用性については明らかではない。

一方、近年では、アスペクト比の大きな細径繊維をコンクリートに混入する場合の検討も行われている。例えば、川西ら²⁾は、細径ポリプロピレン繊維を 0.3%程度まで混入した FRC の流動性について実験的に検討しており、流動性と単位水量ならびに単位粗骨材絶対容積の関係を明らかにするとともに、配合の修正方法を提案している。敵ら³⁾はひずみ硬化型セメント複合材料に対して粗骨材を混入した場合の流動性について実験的に検討しており、粗骨材混入率 20vol%であってもスランプフローが 300mm 得られる配合が可能であることを示している。また、李ら⁴⁾は細径 PP 繊維を 1.0vol%混入した配合でスランプ 12cm 程度得られる場合があることを示している。

以上のように、繊維補強コンクリートにおいてアスペ

クト比の大きい細径繊維を使用した検討は行われているものの、その多くが実験事実に基づいた検討である。FRC の配合を理論的に求めることができれば、より多様な FRC を作製することが可能になると考える。

これまで、コンクリートの配合設計手法の一つとして余剰ペースト理論を用いた理論的な配合設計法が検討されている。例えば、松下ら⁵⁾、三宅ら^{6,7)}は、Kennedy et al.の余剰ペースト理論⁸⁾を用いて、普通コンクリートに対する余剰ペースト理論の適用性について検討している。その結果、スランプは余剰ペースト膜厚に支配されること、ならびに、単位水量および単位セメント量が一定の場合には、最大スランプは細骨材・粗骨材混合物の最大実積率を得られる細骨材率ないし、やや小さい細骨材率で得られることを示している^{6,7)}。ここで、繊維補強コンクリートにも余剰ペースト理論が適用できれば、繊維補強コンクリートの配合設計を合理的に行うことができると考える。そこで本研究では、FRC に対する余剰ペースト理論の適用性について検討した。本研究では、まず FRC に標準的に用いられる繊維長 30mm、繊維径 660 μ m（アスペクト比 60.6）の太径繊維を用いて検討した後、繊維長 12mm、繊維径 40 μ m（アスペクト比 300）の細径繊維への適用性について検討した。

2. 余剰ペースト理論の FRC への適用

コンクリートの流動性は、余剰ペースト膜厚 δ を骨材の平均粒径 d で除したペースト膜厚粒径比 δ/d により評価できることが知られている⁹⁾。Kennedy et al.による余剰ペーストの定義は、「全ペーストから棒突き詰め込み状態の骨材間空隙を埋めるのに等しいペーストを差し引いた残りのペースト」である⁹⁾。したがって、コンクリート 1m³あたりの余剰ペースト量は、式(1)により算出され

*1 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科（学生会員）

*2 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博士（工学）（正会員）

る⁹⁾。

$$P_{exc} = 10^4 \cdot (G - G_s) \quad (1)$$

ここに、 P_{exc} は余剰ペースト量(cm^3/m^3)、 G は繊維・細骨材・粗骨材混合物の実積率(%), G_s はコンクリート中に占める繊維・細骨材・粗骨材の比率(%)である。また、平均余剰ペースト膜厚は、余剰ペースト量を繊維ならびに骨材表面積で除した式(2)により求められる⁹⁾。

$$\delta = 10^4 \cdot \frac{P_{exc}}{\Sigma S} \quad (2)$$

ここに、 δ は余剰ペースト膜厚(μm)であり、 ΣS は繊維と骨材の表面積である。

繊維および骨材の比表面積平均粒径 d は、平均比表面積に等しい表面積を有する球体の直径であると仮定すると、式(3)で示すように比表面積平均粒径 d の比表面積は繊維および骨材の比表面積と等しくなる。従って、比表面積平均粒径 d は、式(3)を d について解いた式(4)で得られる。

$$\frac{\pi d^2}{\pi d^3} = 10^{-4} \cdot \frac{\Sigma S}{\Sigma V} \quad (3)$$

$$d = 6 \times 10^4 \cdot \frac{\Sigma S}{\Sigma V} = 6 \times 10^8 \cdot \frac{G_s}{\Sigma S} \quad (4)$$

ここに、 d は繊維および骨材の比表面積平均粒径(μm)であり、 ΣV はコンクリート 1m^3 中の繊維および骨材の体積(cm^3)である。その結果、式(1)、(2)および(4)を用いることで、ペースト膜厚粒径比 δ/d は次式のように表される。

$$\frac{\delta}{d} = \frac{G - G_s}{6 \cdot G_s} \quad (5)$$

式(5)は、繊維を球体として扱うという大きな仮定を設けることで得られたものであり、この仮定の妥当性については十分な検証が必要であると考ええる。しかし、簡便な手法であることを優先して、本研究では式(5)を用いることとした。

3. 実験概要

3.1 使用材料および配合

表-1に本研究で使用した材料の物性を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、混和材としてフライアッシュⅡ種を用いた。細骨材には川砂を、粗骨材には碎石を使用した。繊維には、寸法の異なる2種類のポリビニルアルコール繊維（以下、PVA繊維）を使用した。それぞれ、繊維径 $660\mu\text{m}$ 、繊維長 30mm の太径繊維（以下、PVA30）と、繊維径 $40\mu\text{m}$ 、繊維長 12mm の細径繊維（以下、PVA12）である。

表-2に配合を示す。水粉体比(W/B)は40%で統一し、粉体重量に対するフライアッシュの比(FA/B)を30%とし

た。繊維混入率の違いが実積率およびスランプにおよぼす影響を把握するため、繊維混入率(Vf)を0.5、1.0、1.5vol%の3水準とした。なお、繊維はコンクリート全体に対して外割で混入した。また、ペースト量の違いによる影響を把握するため、単位水量(W)を180、200、220 kg/m^3 の3水準とした。細骨材率(s/a)は、30～80%の範囲で変化させた。

表-1 材料の物性値

使用材料	備考
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度:3.15 g/cm^3
フライアッシュ	JISA6201Ⅱ種, 密度:2.25 g/cm^3
細骨材	普通砂, 密度:2.58 g/cm^3
粗骨材	最大寸法:20mm 密度:2.68 g/cm^3
PVA 繊維 (PVA30)	繊維径:660 μm , 繊維長:30mm, 密度:1.3 g/cm^3
PVA 繊維 (PVA12)	繊維径:40 μm , 繊維長:12mm, 密度:1.3 g/cm^3
混和剤	増粘剤-液型高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体)

表-2 配合条件

W/B (%)	FA/B (%)	s/a (%)	W (kg/m^3)	Vf (%)
40	30	30～80	180 200 220	0.5 1.0 1.5

*混和剤はセメント重量の1.5%混入

3.2 試験方法

実積率試験は、繊維・細骨材・粗骨材混合物を対象として、ジッキング法により行った。試料は乾燥させたものを用意し、それぞれの試料を均一に混ぜた混合物を用いて試験を行った。

繊維・細骨材・粗骨材混合物の実積率は、式(6)により計算した。

$$G = \frac{100 \cdot W_j \cdot (\rho_f \rho_g W_s + \rho_f \rho_s W_g + \rho_s \rho_g W_f)}{V_j \cdot \rho_s \rho_g \rho_f (W_s + W_g + W_f)} \quad (6)$$

ここに、 G は繊維・細骨材・粗骨材混合物の実積率(%), gW_j は、試験容器内の試料の重量(g), V_j は試験容器の体積(cm^3)であり、 ρ_s , ρ_g および ρ_f は、それぞれ細骨材、粗骨材およびPVA繊維の乾燥密度(g/cm^3)である。

本研究で検討した配合では、同一の繊維混入率と細骨材率の場合、単位水量の違いは細骨材と粗骨材の量の違いであることになる。したがって、所定の比率で細骨材

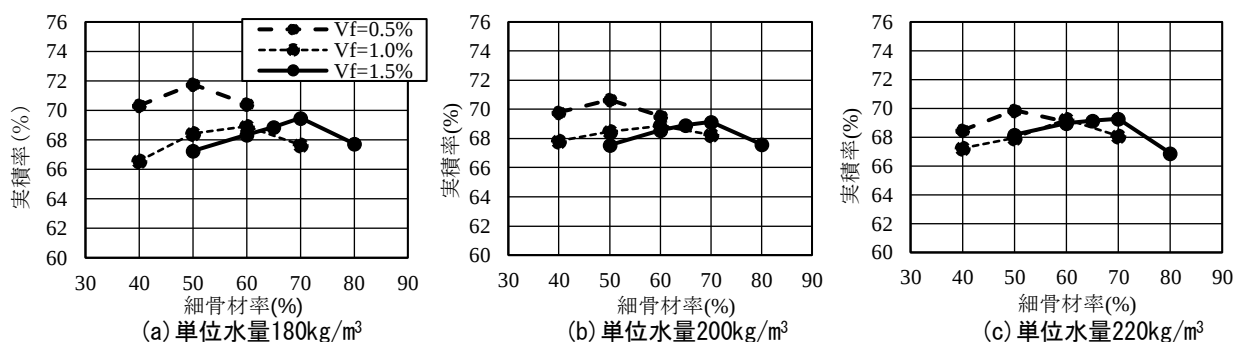


図-1 実積率試験結果

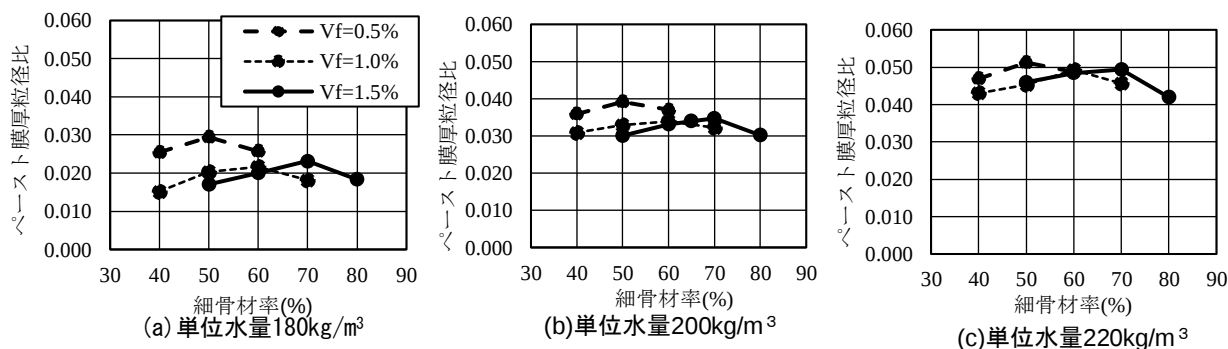


図-2 細骨材率とペースト膜厚粒径比

と粗骨材を追加混入することで、単位水量を小さくした配合の混合物を得ることとなる。そこで、本研究では、例えば、繊維混入率 0.5%、細骨材率 40%で単位水量 220kg/m³の配合に対して実積率を測定した後、細骨材と粗骨材を所定の量を加えることにより、単位水量 200kg/m³の場合の配合として検討した。なお、別途初期から所定の割合で試験を行った場合と比較して、上記の方法で行ったことによる影響はほとんどないことを確認している。

4. 太径繊維を混入した FRC に関する検討

本章では、太径繊維である PVA30 を用いた FRCC を対象として、実積率試験を行うとともに、ペースト膜厚粒径比が最大となる細骨材率について検討する。その後、スランブ試験を行い、流動性に及ぼす影響について考察する。

4.1 実積率試験に基づいたペースト膜厚粒径比

図-1 に繊維・細骨材・粗骨材混合物の実積率試験の結果を示す。図より、繊維混入率が 0.5vol%と小さい場合には、単位水量の増加に伴い実積率が低下する傾向が得られた。一方、繊維混入率が 1.0, 1.5vol%の場合には、単位水量の大きさによる影響は明確には見られなかった。繊維混入率の違いに着目すると、繊維混入率が大きくなることで、実積率は小さくなる傾向にあることがわかる。これは、繊維の混入量が増加することにより骨材の充填が阻害されたためであると考えられる。

また、このことは、それぞれの繊維混入率により実積率が最大となる細骨材率が変化することからも理解することができる。すなわち、繊維混入率が小さい 0.5%vol では細骨材率 50%において実積率が最大となるのに対して、1.0, 1.5%vol と増加することで、実積率が最大となる細骨材率は、60, 70%と増加する。繊維混入率の増加は、粗骨材の充填を阻害することになり、より多くの砂を要したためであると考えられる。

図-2 に細骨材率とペースト膜厚粒径比 δ/d の関係を単位水量ごとにまとめたものを示す。図より、単位水量が大きくなるとペースト膜厚粒径比が大きくなる傾向にあることが認められる。これは、本研究では水粉体比を一定としており、ペースト量が増加したためであるといえる。また、繊維混入率の違いによりペースト膜厚粒径比が最大となる細骨材率は異なり、最大となる細骨材率は単位水量の大きさによらず同一であることがわかる。すなわち、いずれの単位水量においても、繊維混入率 0.5, 1.0, 1.5vol%に対して、ペースト膜厚粒径比が最大となる細骨材率は、それぞれ 50, 60, 70%となっている。

ここで、本結果を図-1 の実積率試験の結果と併せてみると、いずれの繊維混入率においても、実積率が最大となる細骨材率において、ペースト膜厚粒径比も最大となっていることがわかる。このことから、FRCC に対しても余剰ペースト理論を適用可能であることが示された。

4.2 スランブ試験による流動性の検討

図-3 に、各単位水量におけるスランブ試験の結果を示

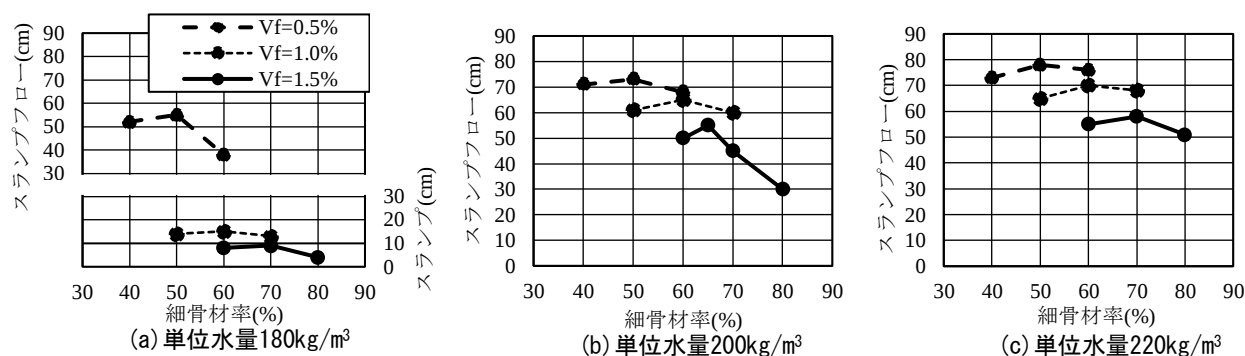


図-3 細骨材率とスランプフローおよびスランプ

す。図において、横軸は細骨材率を示している。縦軸はスランプフローを示しているが、単位水量 180kg/m^3 かつ繊維混入率 $1.0\text{vol}\%$ と $1.5\text{vol}\%$ の場合には、いずれの細骨材率においてもスランプとなったため、図-3(a)の一部ではスランプを示している。

図より、繊維混入率が $0.5\text{vol}\%$ の場合には、いずれの単位水量においても、細骨材率 50% においてスランプフローが最大となる結果が得られた。また、繊維混入率 $1.0\text{vol}\%$ の場合にも、いずれの単位水量においても細骨材率 60% においてスランプまたはスランプフローが最大となった。繊維混入率 $1.5\text{vol}\%$ の場合には、単位水量 200kg/m^3 の場合を除き、細骨材率 70% においてスランプまたはスランプフローが最大となった。これらの結果は、前節で得られたペースト膜厚粒径比が最大となる細骨材率に一致していることが分かる。また、繊維混入率 $1.5\text{vol}\%$ 、単位水量 200kg/m^3 の場合には、細骨材率が 65% においてスランプフローが最大となった。

既往の研究より²⁾、コンクリートのスランプが最大となる細骨材率は、ペーストの性状が一定である場合には、混合物の実積率が最大となる細骨材率ないしはやや粗めであることが指摘されている。本研究での検討の結果、太径繊維を用いた FRCC においても、余剰ペースト理論を適用することで、流動性が最大となる配合を求めることが可能であることが示された。

なお、鋼繊維補強コンクリートの設計施工指針(案)には、アスペクト比が 60 の鋼繊維を用いた場合の配合修正方法が示されている。それによると、繊維混入率を $0.5\text{vol}\%$ 増減させた際の配合修正としては、細骨材率を 8% 増減させることとなっている。本研究の検討の範囲内ではあるものの、同程度のアスペクト比を持つ PVA 繊維を用いた FRC に対しても、概ね同様の修正方法であることが確認できた。

5. 細径繊維を混入した FRC に関する検討

本章では、繊維形状が異なった場合にも余剰ペースト理論が適用できるかを検討するために細径繊維である

PVA12 を用いて検討した。PVA12 は、一般的にはモルタルに混入して使用され、コンクリートに混入されることはない。著者らの既往の研究²⁾では、粗骨材を混入することで、流動性が著しく低下することが確認されている。本研究では、余剰ペースト理論の観点から細径繊維を混入した FRC の流動性について検討する。

5.1 実積率試験およびスランプ試験結果

図-4 に実積率試験の結果を示す。図-1 と同様に、繊維混入率ごとに細骨材率との関係を示している。

図より、PVA30 の場合と同様に、各繊維混入率において、それぞれ異なる細骨材率で実積率が最大となった。また、繊維混入率が増えるほど、最大実積率を得る細骨材率が大きくなる傾向にあった。実積率が最大となる細骨材率は、繊維混入率 0.5 、 1.0 、 $1.5\text{vol}\%$ に対して、それぞれ 40 、 50 、 60% であった。この結果を PVA30 と比較すると、同一の繊維混入率では 10% 程度小さい細骨材率であることがわかる。実積率試験は、骨材の形状や粒度を評価する試験とされていることから、繊維形状の違いが影響していると思われる。すなわち、繊維長が短い PVA12 を用いた場合には、PVA30 を用いた場合と比較して粗骨材の充填性が相対的に高まり、わずかな細骨材のみで充填が可能であったため、最大実積率を得る細骨材率が小さくなったと推測される。

図-5 に細骨材率とペースト膜厚粒径比 (δ/d) の関係を単位水量ごとにまとめたものを示す。図より、PVA30 の場合と同様に、いずれの繊維混入率、単位水量においても、実積率が最大となる細骨材率においてペースト膜厚粒径比が最大となることが確認できる。

ここで、各単位水量でペースト膜厚粒径比が最大となる細骨材率の前後 10% の範囲に対して、スランプ試験を実施した。図-6 に細骨材率とスランプの関係を示す。単位水量 180kg/m^3 で繊維混入率 $1.5\text{vol}\%$ の場合を除き、いずれの場合においても、ペースト膜厚粒径比が最大となる細骨材率においてスランプが最大となった。このことから、繊維長 12mm 、繊維径 $40\mu\text{m}$ の細径繊維を用いた FRC に対しても余剰ペースト理論を適用することが可能であ

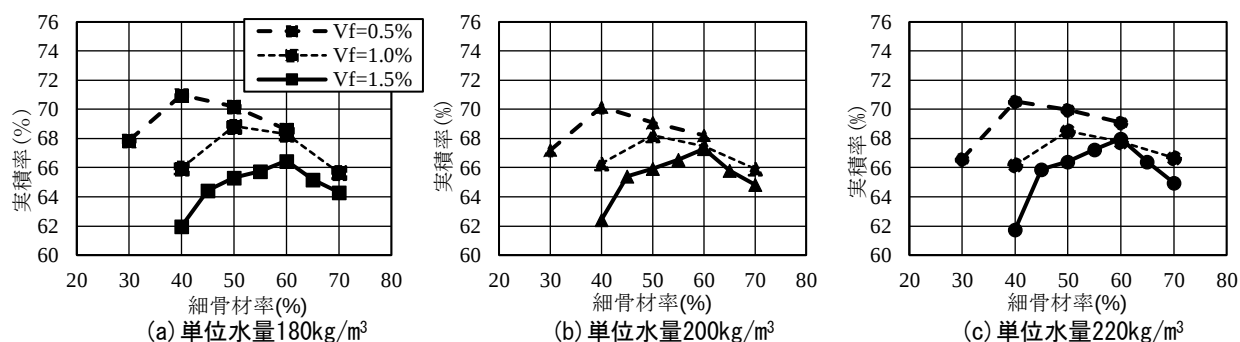


図-4 実積率試験結果

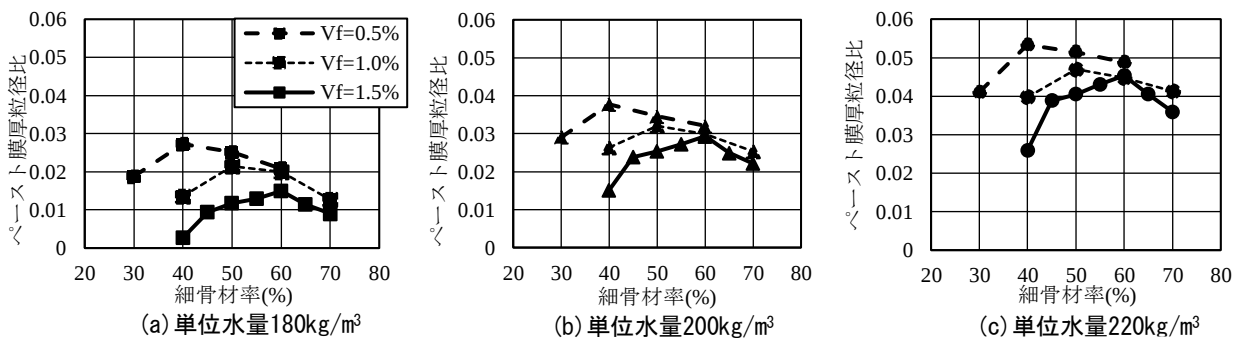


図-5 細骨材率とペースト膜厚粒径比

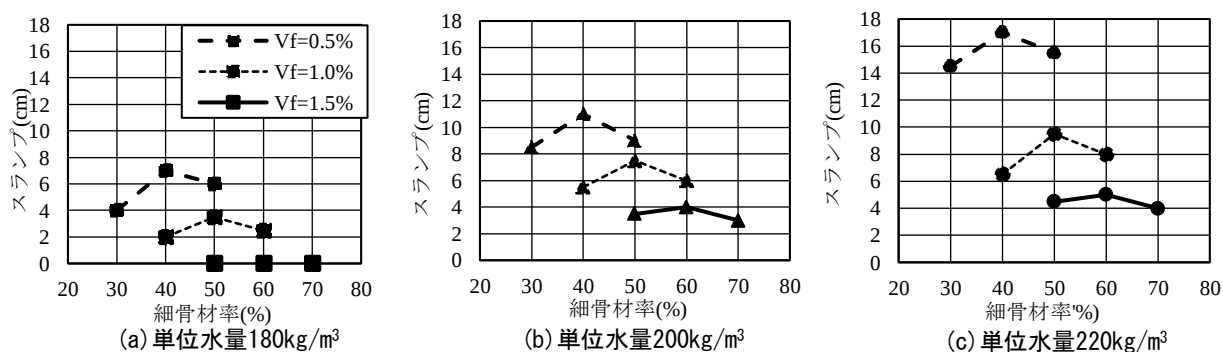


図-6 細骨材率とスランプ

ることが確認された。

また、単位水量 180kg/m³ で繊維混入率 1.5% の場合には、ペースト膜厚粒径比の大小にかかわらずスランプは得られなかった。これは、当該のケースにおいては、スランプを得るためのペースト量が不足していたことが原因であると推察される。すなわち、いずれのケースにおいても δ/d は 0.015 以下であり、本研究における配合では、この程度のペースト膜厚粒径比では FRC においては流動性を確保することができなかったものといえる。ただし、ペーストの性状によっては、流動性を確保することのできるペースト膜厚粒径比は異なってくる可能性があり、この点について今後より詳細に検討する必要があると考える。

5.2 ペースト膜厚粒径比とスランプの関係

図-7 にペースト膜厚粒径比 (δ/d) とスランプの関係を示す。図より、ペースト膜厚粒径比が大きくなるに従い、

スランプが増大する傾向が得られている。また、両者の関係は概ね線形関係にあり、その傾きは繊維混入率の違いにより異なっている。すなわち、繊維混入率が増加するに従って傾きは小さくなっており、同一のペースト膜厚粒径比で比較すると、繊維混入率の大きいほどスランプは小さい。松下らによれば、ペーストの性状が同じであれば、 δ/d を指標にすることにより、スランプの大小を評価できることが指摘されている⁵⁾。今回のように繊維混入率の違いによりスランプが異なる結果となった理由は、ペーストの流動性の観点から考えると説明できる。すなわち、繊維混入の影響をペースト側で考える（繊維＋ペースト）と、繊維混入量が大きいほど繊維＋ペーストの流動性が低くなり、FRC においても同一 δ/d では繊維混入率が高いほどの流動性が低下したものと考えられる。また、前節で指摘したように、ペースト性状が異なれば FRC の流動性も異なると考えられ、ペースト膜厚粒径比

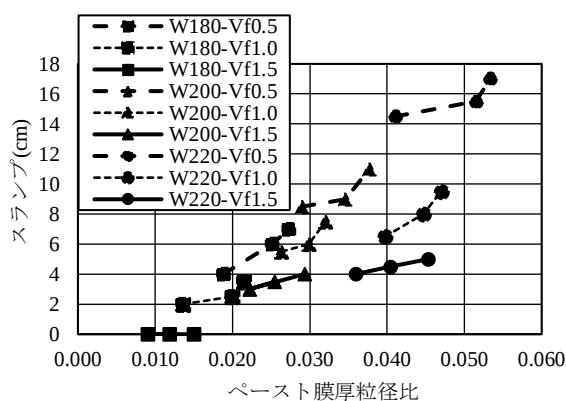


図-7 ペースト膜厚粒径比とスランプ関係

とスランプの傾きは変化するものと考える。また、本研究では、水粉体比を一定としていることから、単位水量の増加に伴いペースト量は増加する。その結果、 δ/d は大きくなり、スランプは大きくなった。このことから、単位水量を増加することにより、より大きな流動性を確保することも可能であると考えられるが、既往の研究³⁾より、単位水量の増加は材料分離を引き起こす結果も得られており、注意を要する。適切な単位水量の範囲についても今後検討が必要であると考ええる。

6. 結論

本研究では、繊維補強コンクリートに対して、コンクリートの配合設計法の一つである余剰ペースト理論の適用性について検討した。余剰ペースト理論を適用する際には、繊維を同一体積および同一表面積を有する球体と仮定した。セメント重量の30%をフライアッシュⅡ種で置換した水粉体比40%のコンクリートに対して繊維を0.5～1.5vol%混入したFRCCを対象として、単位水量180～220kg/m³の範囲で検討した結果、限られた検討の範囲内ではあるが、以下の知見を得た。

- (1) 混入繊維として、繊維長30mm、繊維径660 μ mの太径繊維を用いた場合、余剰ペースト理論に基づいて余剰ペースト膜厚粒径比を算出した結果、実積率試験が最大となる細骨材率において、余剰ペースト膜厚粒径比が最大となった。また、余剰ペースト膜厚粒径比が最大ないしはやや粗めの細骨材率となる配合において流動性は最大となった。したがって、太径繊維を用いた繊維補強コンクリートに対して、余剰ペースト理論を適用可能である。
- (2) 混入繊維として、繊維長12mm、繊維径40 μ mの細径繊維を用いた場合においても、前項と同様の結果が得られたことから、細径繊維を用いた繊維補強コンクリートに対しても、余剰ペースト理論を適用可能であると考ええる。
- (3) 繊維補強コンクリートの流動性は、余剰ペースト膜

厚粒径比が大きくなるほど高くなる結果が得られた。ただし、本研究では、混入繊維が細いほど、混入率が大きくなるほど、流動性は低下する結果となった。ペーストの粘性を調整することができれば、同一の余剰ペースト膜厚粒径比に対してより流動性の高い繊維補強コンクリートが達成されるものと考ええる。

今後は、適用可能な単位水量の範囲を明らかにするとともに、水粉体比やフライアッシュ置換率、使用混和剤を変化させる等により、異なるペースト性状を有する繊維補強コンクリートについて検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究で用いた材料は、住友大阪セメント株式会社、株式会社関電パワーテック、株式会社クラレならびにポゾリス ソリューションズ株式会社から、それぞれご提供いただきました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)、コンクリートライブラリー第50号、1983.3
- 2) 川西貴士、平田隆祥、河合研至：短繊維を混入したコンクリートの配合設計方法に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.39, No.1, pp.265-270, 2017
- 3) 巖樹光、上田尚史：粗骨材を混入したSHCCの流動性と力学特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.40, No.2, pp.1213-1218, 2018
- 4) 李豪傑、西脇友哉、佐藤駿介、菊田貴恒：細径PP繊維を多混入した繊維補強コンクリートの作製方法に関する一検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.40, No.1, pp.321-326, 2018
- 5) 松下博通、近田孝夫、前田悦孝：コンクリートの配合設計への余剰ペースト理論の適用に関する基礎的研究、土木学会論文集、Vol.37, No.578, pp.57-70, 1997
- 6) 三宅淳一、松下博通、取違剛：余剰水膜によるモルタルおよびコンクリートのコンシステンシーの評価に関する研究、土木学会論文集、Vol.62, No.2, pp.306-319, 2006
- 7) 三宅淳一、松下博通：フレッシュコンクリートの変形性を最大にする細骨材率に関する研究、土木学会論文集、Vol.64, No.2, pp.361-370, 2008
- 8) Kennedy, C.T.: The Design of Concrete Mixtures, Proceeding of ACI, 36, PP373-400, 1995