

論文 粒度分布の異なる細骨材を用いた高流動モルタルへの水膜モデルの適用

緑川猛彦^{*1}・Galia I. Pelova^{*2}・Joost C. Walraven^{*3}

要旨：細骨材の粒度および細骨材容積比を変化させた高流動モルタルを作製し、余剰ペースト膜厚理論および水膜モデルに基づいて、モルタルの配合について検討した。さらに、セメント粒子の凝集度を逆解析的に求め、高性能減水剤との関係からその妥当性を検討し、水膜厚さについて推察した。その結果、余剰ペースト膜厚理論を適用することにより、ペースト膜厚から水粉体体積比を推測できること、モルタル中の固体粒子間距離を最小とする細骨材容積比が存在すること、およびその細骨材容積比以上の範囲においては細骨材の粒度に関わらず水膜厚が一定値となる可能性があることなどが明らかになった。

キーワード：水膜モデル、余剰ペースト膜厚理論、細骨材の粒度、細骨材容積比

1. はじめに

高流動コンクリートの配合設計の確立に供するために、容易に水粉体体積比の算定が可能である水膜モデルを提案した^{1)・2)}。ここでは主に粉体の特性に焦点を当て、骨材の粒度および骨材容積を固定したモルタルおよびコンクリートで検討を行った。したがって、骨材の種類および粒度を変化させた場合に水膜モデルを適用するためには、更なる検討が必要であった。

本研究は、細骨材の特性に焦点を当て、粉体特性を固定した条件で細骨材の粒度および細骨材容積比を変化させた高流動モルタルについて、余剰ペースト膜厚理論³⁾および水膜モデルを適用し、その妥当性について検討するものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびモルタルの配合

セメントは高炉セメント (CEM III/B 42,5 LH HS, 密度 2.96g/cm³, ブレーン値 4010cm²/g) を用いた。これはオランダにおいて標準的に使用されているもので、高炉スラグ含有率が 69.9% であることから、日本においては高炉セメント C 種に相当するものである。図-1 にレーザー回折・散乱式粒度分布測定装置により測定したセメントの粒度分布を示す。混和剤

はポリカルボン酸系高性能減水剤を用いた。

表-1 に実験に使用した細骨材の性質を示す。細骨材の最大粒径は 4mm である。細骨材はあらかじめ 5 種類の粒径 (0.125~0.25mm, 0.25~0.5mm, 0.5~1mm, 1~2mm, 2~4mm) に分けられていた単粒骨材をブレンドし、粒度分布の異なる 3 種類の細骨材 (Ar, Br, Cr) を作製した。特に Cr は、0.5~1mm の粒径だけを使用したほぼ単粒の細骨材である。図-1 に細骨材の粒度分布を示す。細骨材の実積率は、内径 14cm, 内高 19cm のプラスチック製円筒容器を用い、「骨材の単位容積質量及び実積率試験方法 (JIS A 1104-1999)」に準じて測定した。

モルタルの配合は、上記 3 種類の細骨材を用い、細骨材容積比 s/m を 0% (ペースト) から 60% まで変化させた 20 ケースとした。実験を実施した組合せを表-2 に示す。また、モルタル中における固体材料の粒度分布を図-2 から図-4 に示す。これは、セメントと細骨材の粒度分布を細骨材容積比に基づいて加算し算出したものである。

2.2 実験方法

モルタルのフロー値 (245mm) および V 漏斗流下時間 (10sec) が等しくなるように、水量および高性能減水剤量を調整し各配合を求めた³⁾。モルタルの作製量は 3.5 リットルとし、ホバートミキサー (容

*1 福島工業高等専門学校助教授 建設環境工学科 工博 (正会員)

*2 Research Assistant, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, ME

*3 Prof., Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, DR

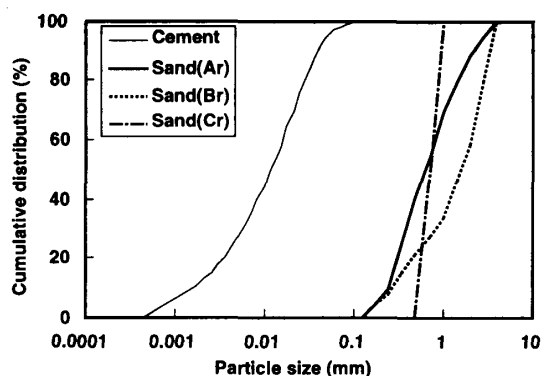


図-1 セメントおよび細骨材の粒度分布

表-1 細骨材の特性

	Ar	Br	Cr
Type	River sand	River sand	River sand
Specific density*	2.60	2.59	2.61
Absorption (%)	0.59	0.91	0.54
F.M.	2.93	3.79	3.00
Solid volume (%)	68.2	71.6	62.7
0.125 ~ 0.25 mm	9.3	8.3	0
0.25 ~ 0.5 mm	30.2	12.5	0
0.5 ~ 1 mm	30.2	12.5	100.0
1 ~ 2 mm	18.6	25.0	0
2 ~ 4 mm	11.6	41.7	0
total (%)	100.0	100.0	100.0

* saturated surface dry base

表-2 実験組合せ

s/m	0%	10%	20%	35%	40%	45%	50%	55%	60%
Paste	*								
Ar				*	*	*	*	*	
Br		*	*	*	*	*	*	*	*
Cr		*	*	*	*	*	*		

量11リットル、公転48rpm、自転110rpm)により練り混ぜた。モルタルの練混ぜ方法を図-5に示す。1次水量は、ペーストのフロー試験から求めた拘束水比(1.040)の0.7倍とした。また、高性能減水剤の性質と考えられたが、練混ぜ終了後にフロー値が増加する傾向を示したため、練混ぜ途中に5分間の静置期間を設けた。

練混ぜ終了後フロー試験およびV漏斗試験を行い、フロー値 $245 \pm 10\text{mm}$ およびV漏斗流下時間 $10 \pm 1\text{sec}$ の範囲を満足するモルタルを作製した。

規定の条件を満足するモルタル作製後、モルタル中における余剰水量を算出するために固体粒子(セメントおよび細骨材)の実積率を測定した。直径22mm、高さ90mmの遠心分離用プラスチック容器に約 27cm^3 のモルタルを注ぎ、4000rpmで10分間遠心分離を行った。この遠心分離回転数は一応の目安として採用したものである。その後、モルタル上面に

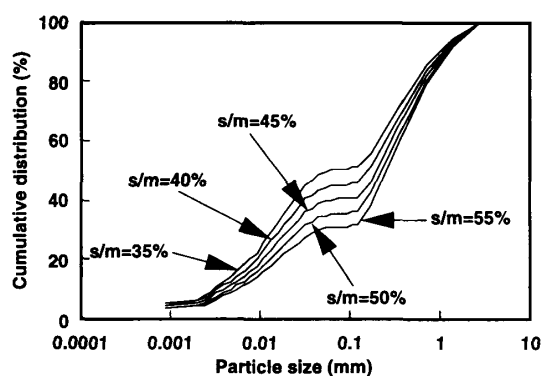


図-2 固体材料の粒度分布 (シリーズAr)

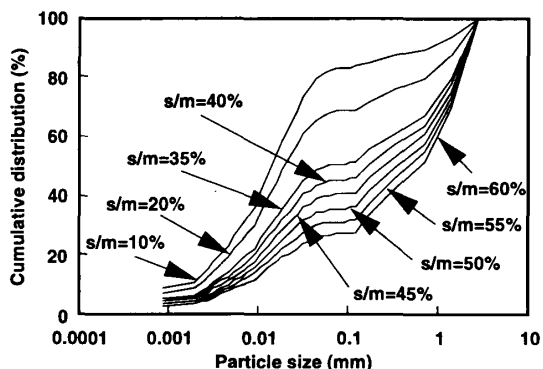


図-3 固体材料の粒度分布 (シリーズBr)

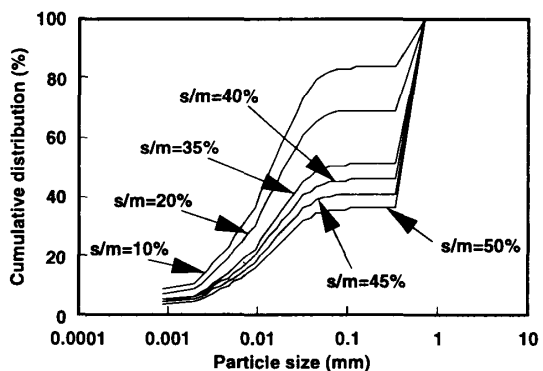


図-4 固体材料の粒度分布 (シリーズCr)

浮き出した水を廃棄し、残りの質量を測定することにより余剰水量を求めた。この測定は1種類のモルタルに付き8個行い、検討にはその平均値を採用した。

3. 結果および考察

3.1 実験結果の概要

図-6にモルタルのフレッシュ性状を等しくした場合における、細骨材容積比と水粉体容積比との関係を示す。また、図-7に細骨材容積比と高性能減水剤添加量との関係を示す。同じフレッシュ性状を有するモルタルを作製するために必要な水量および高性

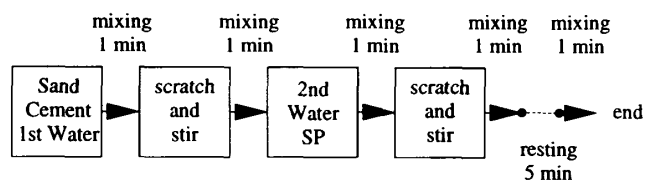


図-5 練混ぜ方法

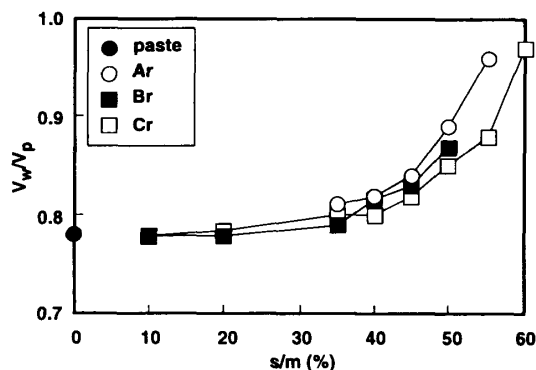


図-6 細骨材容積比と水粉体体積比との関係

能減水剤添加量は、細骨材容積比の増加とともに増加し、さらにその傾向は細骨材の粒度に影響を受けることが分かる。粗粒率の小さい細骨材は、粗粒率の大きいものに比較してより多くの水量および高性能減水剤量が必要である。

細骨材容積比が同じである場合モルタル中における細骨材粒子の数は、粗粒率が小さくなるに従い増加する。このことは、細骨材粒子の衝突や摩擦の可能性を増加させることを意味し、その分モルタルのフレッシュ性状を低下させる。これを回避するためには、細骨材粒子が容易に移動できるようにするため水量および高性能減水剤添加量を増加させなければならない。このことが、細骨材容積比や粗粒率の違いにより水量および高性能減水剤添加量が変化する原因であると考えられる。

3.2 余剰ペースト膜厚に関する検討

余剰ペースト膜厚理論は、約60年前Kennedyにより提案されたものである⁴⁾。図-8にこの理論の概念図⁵⁾を示す。図-8(a)はモルタル中に細骨材が均等に分散しているモデル図である。今、この細骨材を何らかの方法で充填させると、図-8(b)に示すように余剰ペースト分が上部に浮き上がることとなる。この余剰ペーストが細骨材粒子の表面に付着しているものと考え、余剰ペースト膜厚とモルタルのフレッシュ性状との関係を検討するものが、余剰ペースト膜厚理論である。

余剰ペースト膜厚理論における膜厚の算定には、

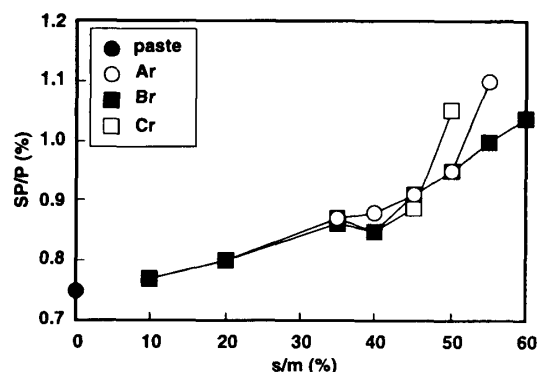


図-7 細骨材容積比と高性能減水剤添加率との関係

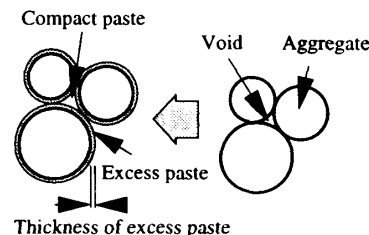
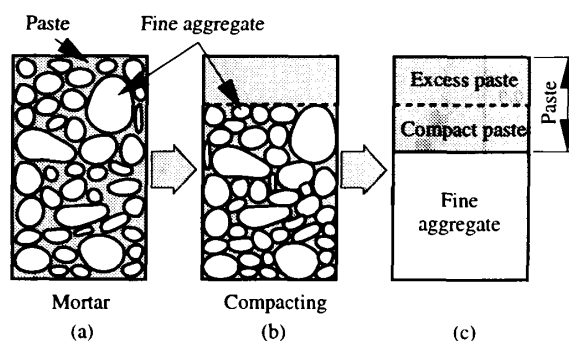


図-8 余剰ペースト膜厚理論

細骨材の表面積が使用される。余剰ペースト体積を細骨材の全表面積で除すれば、ペーストの厚さが計算でき、これは直感的に非常に分かり易いものである。しかしながら、細骨材の表面積は細骨材の粒度と粒子形状に大きく左右されるため、これを正確に測定することは困難であり、かつ立体的に粒子表面に付着しているはずのペースト層を平面的に計算することは、得られる解が物理的に異なるものとなる。このため本研究においては、以下に示す手順によりペースト膜厚を算定した。

1. 本研究で使用した細骨材は川砂であり、粒子形状は丸みを帯びているものであった。したがって、細骨材の粒子形状を球形と仮定し、粒度分布から求めることができる直径に基づいてペースト膜厚を計算する。

2. モルタル中で細骨材は均等に分布していると

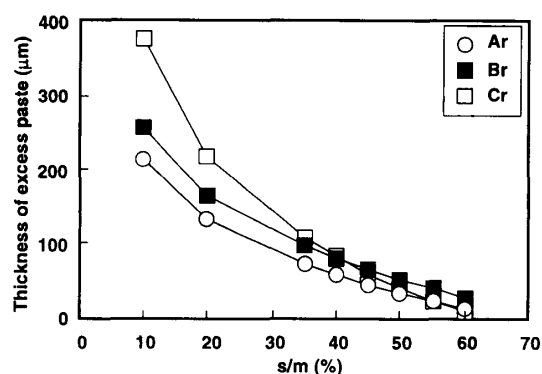


図-9 細骨材容積比と余剰ペースト膜厚との関係

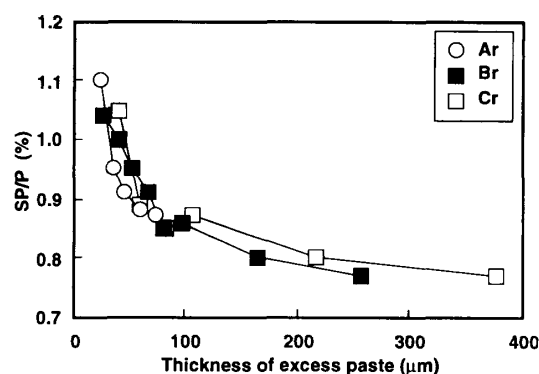


図-11 余剰ペースト膜厚と高性能減水剤添加率との関係

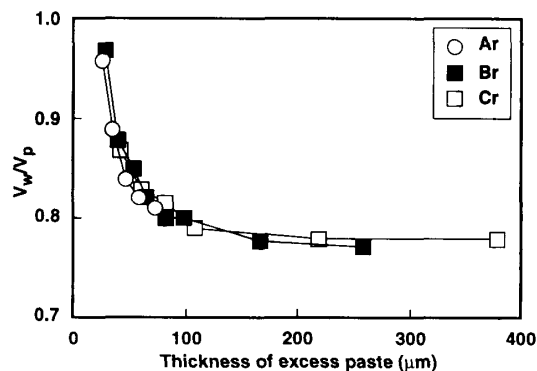


図-10 余剰ペースト膜厚と水粉体体積比との関係

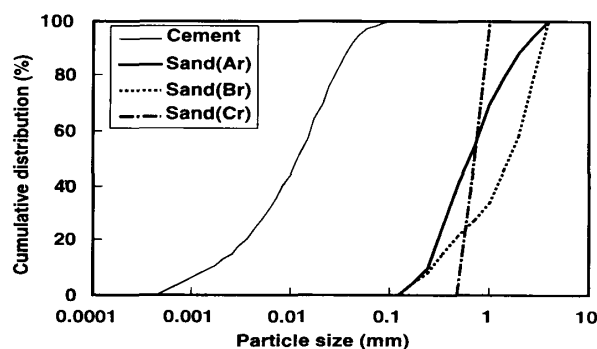


図-1 セメントおよび細骨材の粒度分布

仮定し、細骨材粒子の表面間距離を一定と考えた。したがって、細骨材粒子周りに付着する余剰ペースト膜厚は、細骨材の粒径に関わらず一定厚とした。

上記の算定方法により計算された、各配合における細骨材容積比と余剰ペースト膜厚の関係を図-9に示す。余剰ペースト体積は細骨材の実積率に左右されるため、実積率が大きいほど細骨材粒子間に充填されるペースト量が減少し、余剰ペースト量は増加することとなる。さらに、細骨材容積比が増加するとモルタル中のペースト分が減少するため、余剰ペースト膜厚も薄くなる。

図-10に余剰ペースト膜厚と水粉体体積比との関係を、また図-11に余剰ペースト膜厚と高性能減水剤添加量との関係をそれぞれ示す。同じフレッシュ性状となるモルタルを作製するためには、余剰ペースト膜厚が減少するにしたがって、水量および高性能減水剤添加量を増加させなければならないことがわかる。これは、細骨材の粒子間距離が減少することにより、骨材粒子の衝突や摩擦の影響を大きく受けることとなるため、これを回避するためにペーストの降伏値や粘度を低下させなければならないことに起因すると考えられる。しかしながら、細

骨材の粒度が異なるそれぞれのケースにおいて、余剰ペースト膜厚が等しければほぼ同じ水量および高性能減水剤添加量となることが確認された。この傾向は特に水量に関して相関が高く、このことから、高流動モルタルの単位水量は余剰ペースト膜厚から算定することが可能であるものと考えられる。一方、高性能減水剤添加量については、ばらつきが大きく、かつその種類によりこの傾向が異なるものと考えられるため、更なる検討が必要である。

3.3 余剰水膜厚に関する検討

前節において、モルタルをペーストと細骨材の二層系材料と考え、余剰ペーストの膜厚を算出した。ここでは、モルタルを水と固体材料（セメントと細骨材）の二層系材料と考え、余剰水膜厚について検討することとする。

図-12に余剰水の考え方を示す。図-12 (a) はモルタル中でセメント粒子および細骨材粒子が均等に分散している模式図を示している。今、図-12 (b) に示すように、この固体粒子群を何らかの方法で圧縮充填する事ができれば、上部に分離された水は余剰水と考えることができる。この余剰水量を固体粒子表面に均等厚で付着している膜であるとし、前述の

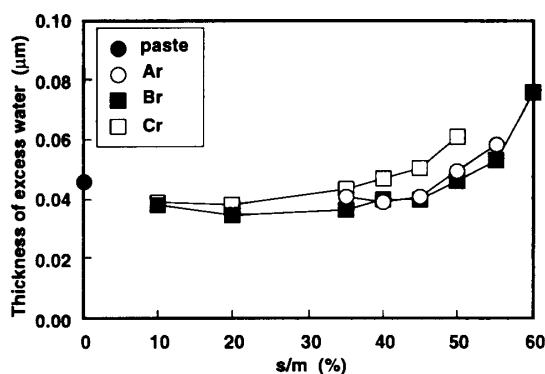


図-13 細骨材容積比と余剰水膜厚との関係

計算手順に従って計算すれば、余剰水膜厚を計算する事ができる。しかしながら、高流動モルタルにおいては水粉体体積比を極力低く抑え、高性能減水剤による助けを借りてフレッシュ性状を満足させているため、一般的な環境下では図-12 (b) に示すような状態を生じさせることは困難である。したがって本研究では、高流動モルタルを遠心分離する事によりこれを達成し、余剰水膜厚を算定することとした。

図-13に細骨材容積比と余剰水膜厚との関係を示す。細骨材容積比が零であるペーストから細骨材量を増加させてゆくに従い余剰水膜厚は減少し、 $s/m=20\%$ 付近で余剰水膜厚は最小値を示す。その後、細骨材容積比の増加とともに余剰水膜厚は再び増加する事となり、粒子間距離を最小とさせる細骨材容積比（以後、最適細骨材容積比と記す。）の存在が示唆された。また、余剰水膜厚は固体粒子の粒度分布に影響され、細かい粒子が多いほど水膜厚は大きくなる傾向を示した。この水膜厚は、遠心分離回転数（遠心加速度）が大きいほど絞り出される水量が増加するため薄くなると予想されるが、遠心加速度を一定とした場合には、この傾向は本結果と同様であるものと考えられる。

実験中、規定のフレッシュ性状を満足するモルタルの作製において、細骨材容積比が小さいケース（ $s/m=0, 10\%$ ）ではV漏斗流下時間を調節することが難しく、一方細骨材容積比が大きいケース（ $s/m=35\%$ 以上）においては、フロー値の調整が難しかった。言い換えれば、細骨材量が少ないケースでは降伏値は比較的安定的であることから境界条件は粘性であり、細骨材量が多いケースでは粘性は比較的安定的であることから境界条件は降伏値であった。これらの経験から、余剰水膜厚が最小となる最

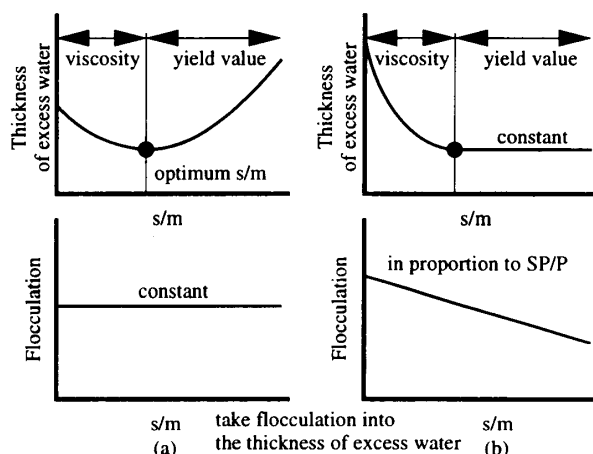


図-14 凝集と余剰水膜厚との関係

適細骨材容積比を境として、細骨材量が少ない場合には降伏値より粘性が卓越し、一方、細骨材量が多い場合には、粘性より降伏値が卓越しているものと考えられる。そして、粘性と降伏値の影響がバランスする細骨材容積比において、余剰水膜厚（粒子間距離）が最小になるものと推察される。

一方これまでの余剰水膜厚の計算において、セメント粒子は完全に分散しているものと仮定し検討を行った。しかしながら、セメント等の粉体は水中で容易に凝集する性質があることや、各モルタルにおける高性能減水剤添加量が異なること等から、モルタル中におけるセメント粒子の分散度は異なっているものと推察される。セメント粒子の分散度は、練混ぜ方法や細骨材容積比および細骨材の粒度等により様々に変化するため一概に断定することは困難であるが、高性能減水剤添加量が多いほど分散は進んでいるものと予想される。したがって、各ケースの配合において、細骨材容積比が増加するほど高性能減水剤添加量が増加していることは、細骨材容積比の増加につれてセメントの分散が進んでいるものと考えられる。

図-14はセメント粒子の凝集と余剰水膜厚との関係を概念的に示したものである。図-14 (a) は粉体の凝集度が一定であると考えた場合における余剰水膜厚の傾向である。一方、(b) に示すように s/m の増加にしたがって高性能減水剤添加量が増加し、セメント粒子の分散度が大きくなると考えれば、余剰水膜厚は、最適細骨材容積比を境に一定値となることが予想される。

3.4 凝集を考慮した水膜モデルの適用

セメント粒子がどのような形態で凝集しているの

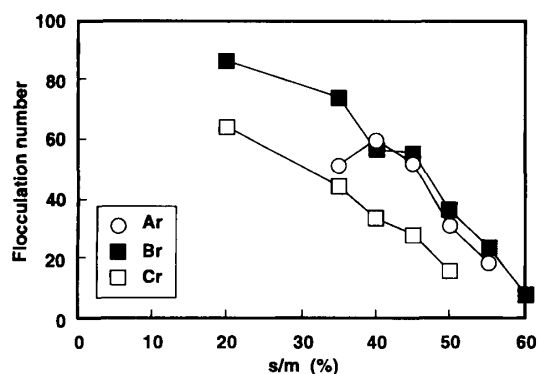


図-15 細骨材容積比と凝集個数との関係

か、あるいはいくつの粒子が凝集しているのかを測定することは非常に困難である。したがってここでは、最適細骨材容積比以降における余剰水膜厚が一定であると仮定し、逆解析的に凝集個数を予測し、求められた凝集傾向と高性能減水剤添加量との関係が妥当であるか否かを検討することによって、現象の解明を試みることにする。

今、余剰水膜厚を0.150mmと設定する。これは最小凝集個数が1個（すべて分散している）未満になることを避けるために設定した値である。これを基に各モルタルの配合からそれぞれの凝集個数を算出し、細骨材容積比との関係を求めたものを図-15に示す。細骨材容積比が増加するに従い凝集個数はほぼ直線的に減少する事が分かる。さらに、図-16に高性能減水剤添加率と凝集個数との関係を示す。高性能減水剤添加量が増加するに従い、凝集個数は減少しセメント粒子が分散している傾向が再現された。各ケースにより分散傾向が異なっているが、これは細骨材の粒度によりモルタルの練混ぜ効果が異なるためと予想される。これらの傾向は、明確な実験結果は無いものの、一般的に知られている高性能減水剤の効果を反映させる結果であり、これらの結果より、最適細骨材容積比以降の余剰水膜厚は細骨材の種類に関わらず一定値となる可能性が高いことが示唆された。

4. まとめ

細骨材容積比および細骨材の粒度を変化させたフレッシュ性状の等しい高流動モルタルの配合から、余剰ペースト膜厚および余剰水膜厚に関して検討を行った。本実験範囲内で得られた事項を以下に示す。

(1) フレッシュ性状が等しい高流動モルタルに

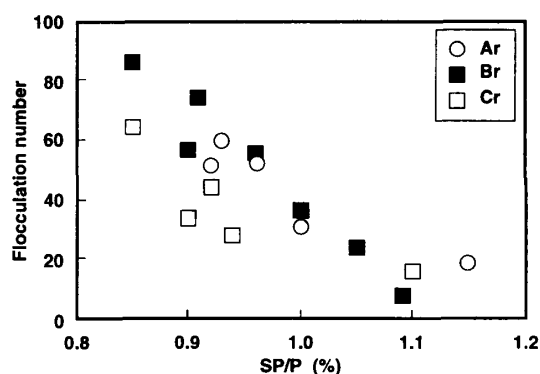


図-16 高性能減水剤添加率と凝集個数との関係

ついて、余剰ペースト膜厚と水粉体体積比との関係を求めた結果、それらの間には高い相関が認められた。したがって、高流動モルタルの水粉体体積比は、細骨材の粒度に無関係に余剰ペースト膜厚から推定できる可能性がある。

(2) フレッシュ性状が等しい高流動モルタルについて、余剰水膜厚と細骨材容積比との関係を求めた結果、余剰水膜厚を最小とする最適細骨材容積比の存在が認められた。経験上この点を境にモルタルのフレッシュ性状は、粘性卓越型から降伏値卓越型へと変化しているものと予想される。

(3) モルタル中のセメント粒子の凝集に関して逆解析的に検討した結果、最適細骨材容積比以降の余剰水膜厚は一定値となる可能性が高い。

参考文献

- 1) 緑川猛彦, 丸山久一, 下村 匠, 桃井清至: 粉体特性の定量化手法に基づくペーストの流動性評価方法, 土木学会論文集No.578/V-37, pp.99-110, 1997.11
- 2) 緑川猛彦, 丸山久一, 下村 匠, 桃井清至: 各種粉体を用いたモルタルおよびコンクリートの流動性評価に関する水膜モデルの適用, 土木学会論文集No.578/V-37, pp.89-98, 1997.11
- 3) 岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅: ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, 1993.9
- 4) Kennedy, C.T. "The design of concrete mixes", Proceedings of the American Concrete Institute, Vol.36, pp.373-400, 1940
- 5) S.G.Oh, T.Noguchi and F.Tomosawa "Toward Mix Design for Rheology of Self-Compacting Concrete", 1st International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, pp.361-372, 1999.9