

論文 水膜モデルを用いた高流動コンクリートの調合設計方法

名和豊春^{*1} 笠谷 進^{*2} 庄司大輔^{*3} 大沼博志^{*4}

要旨：本研究は、異なる粉体を用いた高流動コンクリートの一般的な調合設計方法を確立するために、水粉体比と高性能AE減水剤添加量の推定方法を構築することを目的とした。高流動コンクリートの自己充填性に及ぼす粉体の品質の影響を、自由水量の増大による材料分離としてとらえ、このような現象を説明するものとしてペーストの水膜モデルを構築し、この水膜モデルとコンクリートの自己充填性の関係を実験により検証した。その結果、水膜モデルにより自己充填性が得られる水粉体比の最小値が一意的に表現でき、さらに高性能AE減水剤の添加量もペーストフロー値から推定できることを示した。

キーワード：高流動コンクリート、水膜モデル、自己充填性、高性能AE減水剤、凝集

1. はじめに

コンクリートと構造物の高耐久化や建設工事の合理化などの社会的要請から高流動コンクリートが普及してきているが、一般化した調合設計方法は未だ定式化されておらず、その確立が望まれている。

高流動コンクリートの調合設計において、単位水量と混和剤添加量は、ペーストのフロー試験から求められる拘束水比をもとにモルタルのフロー試験、V漏斗試験により流動性と粘性が適正な範囲に入るように決定する実用的な方法が提案されている¹⁾。

しかし、ペーストの流動特性は、使用する粉体²⁾および混和剤の種類³⁾によって大きく変化し、さらに、粉体と混和剤の相互作用により混和剤の分散効果も異なる。現在、高流動コンクリートに用いられる粉体は各種に渡り、同じ種類の粉体でも比重、比表面積、粒子形状、粒度分布などの物理的性質や初期水和特性といった化学的性質が異なる。なお、粉体のこれらの性状が異なった時の単位水量や混和剤添加量

の最適値を簡易に決定する方法は現在まで確立されておらず、調合は多くの試し練りを行い試行錯誤によって決定しているのが現状である。したがって、高流動コンクリートの一般的な調合設計を確立するためには、粉体が変化した時の単位水量および高性能AE減水剤添加量の推定方法を構築することが不可欠であると考えられる。

本研究は、これらの背景を踏まえて、粉体の粒度分布や形状から決まる粉体粒子の周りに形成される水膜に着目し、水膜の厚さと高流動コンクリートの流動性を関連付けて、一般的な調合設計方法を見出そうと試みたものである。

2. 水膜モデルを用いた高流動コンクリートの調合設計方法に関する作業仮説

2.1 水膜モデルの基本概念

枝松ら⁴⁾によれば、粉体の粒度分布の差異がモルタルの流動性に大きく関係し、緑川ら⁵⁾は拘束水比、すなわち流動が開始する水粉体容積比は、粉体の空隙率が増すと増大することを

* 1 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤専攻 工博（正会員）

* 2 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤専攻

* 3 北海道大学大学院 工学研究科社会基盤専攻

* 4 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤専攻 工博（正会員）

報告している。また、内川ら⁶⁾は、セメントの初期水和特性が同じであるならば、粉体の充填率が高いほどペーストの降伏値が小さくなることを示しており、著者ら⁷⁾もフライアッシュを使用した高流動コンクリートの自己充填性は、粉体の充填率と関連することを示した。

一方、コンクリートでも、充填率すなわち実積率の高い骨材を用いた場合、コンクリートの流動性が向上することが知られており、その理由は、「コンクリートの流動性は、全ペーストから骨材空間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（余剰ペースト）量を骨材表面積で除した余剰ペースト膜厚に比例する」として説明されている⁸⁾。

本研究では、ペーストを水に、骨材を粉体粒子と置き換えた水膜モデルを考え、ペーストの流動性に及ぼす粉体の影響を一般的に取り扱い、高流動コンクリートの調合設計方法に適用することを試みることにした。仮定した水膜モデルの基本概念は、「ペーストの流動性は、全水量からセメント粒子間に存在し流動性に関与しない水量（拘束水量）を差し引いた余剰水量（自由水量）を、粉体表面積で除した水膜の厚さに比例する。」と表わされる。本モデルは、緑川ら⁹⁾の水膜モデルと類似しているが、拘束水量を粉体の充填率Gから求めている点が異なる。なお、水膜厚さδは次式により算出した。

$$\delta = V_p(G - C_p) / (Sp \cdot Cp) \quad (1)$$

ここに、 V_p はペーストの体積、 C_p はペースト中の粉体の体積濃度、 Sp は粉体の表面積である。

2.2 粒子の凝集が水膜モデルに及ぼす影響

上述の水膜モデルは、基本的には完全に分散したセメント粒子を対象としているが、一般に粉体粒子は凝集するため、凝集の効果を水膜モデルに反映する必要がある。すなわち、凝集した粉体粒子の間には、粉体の空隙率以上の拘束水が存在するため、流動に関与する自由水量がより減少し、流動性が低下することになる。

なお、高性能AE減水剤等の分散作用を有する混和剤を添加したペーストは、一般的に小さい水粉体容積比で無添加のものと同じフロー値を示す。これは、混和剤が粉体表面に吸着して、粉体粒子間に電気的反発力あるいは立体障害反発力が生じ、粒子が分散することに起因する。

実際、ペーストの流動性に及ぼす水粉体比と高性能AE減水剤添加量の影響を調べると、図-1に示すように水粉体比とペーストフロー値の関係が変化する屈曲点が存在し、さらに高性能AE減水剤の添加により屈曲点が低水粉体比側にシフトすることが分かる。

屈曲点より大きい水粉体比では、静置しているとブリーディングが発生していくのが目視で観察され、明らかに粒子が分散し、粒子間に自由水量が発生しているものと考えられる。

また、高性能AE減水剤添加量の増大による屈曲点のシフトは、粉体粒子がより分散し、凝集による拘束水量が減少するためと考えられる。

なお、図-1の結果を、水膜厚さで示すと図-2のようになり、ペーストの流動性が大きい領域では屈曲点での水膜厚さは約0.15μmと

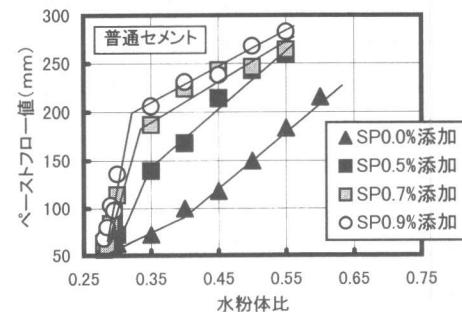


図-1 水粉体比とペーストフロー値の関係

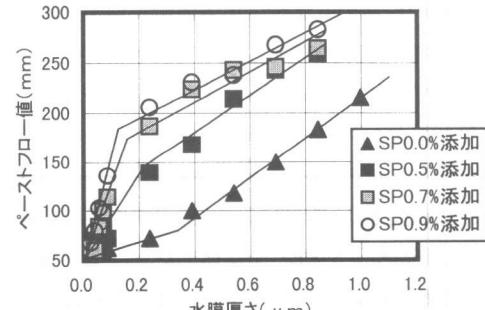


図-2 水膜厚さとペーストフロー値の関係

かなり小さな値となり、水が粉体粒子の間をほぼ充填した状態に相当すると考えられる。

以上の結果より、水膜モデルに基づくと粉体の高濃度サスペンジョンの流動性は、2つの領域に大きく別けられると考えられる。すなわち、一つの領域は屈曲点より小さい水粉体比の領域で、粒子（凝集粒子を含む）間は全て水で満たされておらず、流動に関与する自由水は少ない。このため、高性能AE減水剤添加量の増大による粒子の分散や水粉体比の増大により、流動に関与する自由水量すなわち水膜厚さが増大すると流動性が大きく改善される。他方、屈曲点より大きい水粉体比の領域では、粒子間は全て水で満たされており、流動に関与する自由水は多く、粒子の移動は容易になり、流動性は粒子表面に形成された水膜厚さの影響を受けるが、屈曲点以下に比べ、その効果は小さくなる。

2.3 水膜モデルを用いた高流動コンクリートの調合設計方法の基本概念

皆口ら¹⁰⁾によれば、高流動コンクリートの自己充填性は、材料分離の影響を受け、ペーストから分離した水量が、ある値を超える場合には流動性が高くても材料分離が生じ自己充填性が低下する。また、加藤ら¹¹⁾によれば、ブリーディング現象は外部拘束水の低下による自由水量の増大に起因する。これより、ペーストフロー値の屈曲点より大きい水粉体比では、自由水が粒子表面に均一に付着しておらず、ペースト中に不均一に分布する現象、すなわち材料分離が生じ易く、高流動コンクリートの自己充填性が低下することが予想される。

したがって、先に述べた水膜モデルに基づくならば、高流動コンクリートは図-1の屈曲点をある値以上超えた水粉体比では、材料分離を起こし自己充填性が低下するものと考えられる。他方、屈曲点を超えない場合は、ペーストの流動性が低いと、やはり自己充填性が低下するものと考えられ、屈曲点の付近で流動性を高めれば、適切な自己充填性を有する高流動コンクリートの製造が可能であると考えられる。

3. 実験の概要

3.1 使用材料

粉体は、普通ポルトランドセメント（比重3.16、ブレーン比表面積3320cm²/g）および品質の異なる2種類の海外炭フライアッシュ（SUおよびBU）を用いた。表-1に、使用したフライアッシュの物性を示す。

細骨材は勇払産の陸砂（表乾比重2.71、粗粒率2.54）を、粗骨材は常盤産砕石（表乾比重2.67、粗粒率6.70、実積率51.8%）を用いた。混和剤は、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤を用いた。

3.2 ペーストおよびコンクリートの作製

フライアッシュはセメントの内割で置換し、置換率は容積で50%とした。この時の混合した粉体の充填率は、フライアッシュSUを用いた場合で61.6%、BUで56.9%であった。

ペーストの調合は、水粉体比（重量比）を0.24～0.40の範囲で変化させた。ペーストは、材料を一括投入し、ハンドミキサーで3分間練り混ぜ作製した。

コンクリートの調合は、単位粗骨材絶対容積および細骨材／モルタル容積比を、それぞれ0.274m³/m³および0.45とし、水粉体比および高性能AE減水剤添加量を変化させた。また、空気量の影響を除外するために、ポリアルキレングリコール系消泡剤を用いて、空気量を1.5±1.0%に調整した。

コンクリートは、パン型強制練りミキサー（容量55ℓ）を用いて練り混ぜた。練混ぜは、材料を一括投入し30秒空練りした後、1次水を投入して1分間練混ぜ後、さらに粗骨材と2次水（混和剤を含む）を加えて2分間行った。1次水と2次水の割合は80:20とした。

表-1 フライアッシュの物性

記号	強熱減量(%)	比重	ブレーン比表面積(cm ² /g)	充填率 ¹⁾ (%)
SU	0.1	2.35	2310	69.9
BU	2.0	2.18	3430	60.5

注1) 既報⁷⁾に報告した試験方法に従った。

3.3 実験方法

(1) ペーストの流動性の測定

ペーストの流動性は、「JASS 15 M-103」に準じて測定したフロー値（以下ペーストフロー値と呼ぶ）によって評価した。

(2) コンクリートの流動特性の測定

コンクリートの流動特性として、流動性をスランプフロー試験により、材料分離抵抗性に関する粘性をV漏斗試験により評価した。また、自己充填性の評価方法としては、土木学会基準に規定されたU形充填試験を用いた。流動障害はR1とし、充填高さ30cm以上で自己充填性を有すると判定することとした。

4. 実験結果および考察

4.1 ペーストの流動性

図-3および図-4に、フライアッシュSUおよびBUを用いたペーストの水粉体比とペーストフロー値の関係を示す。図より、フライアッシュの種類によって屈曲点を示す水粉体比が異なり、フライアッシュSUを用いた場合に

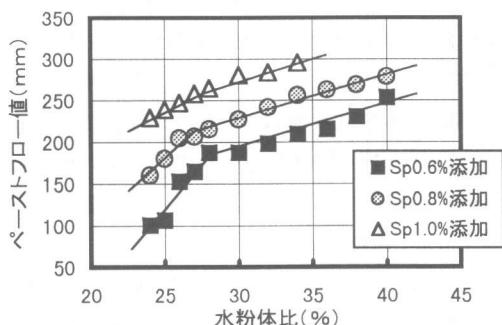


図-3 水粉体比とペーストフロー値の関係(フライアッシュSU)

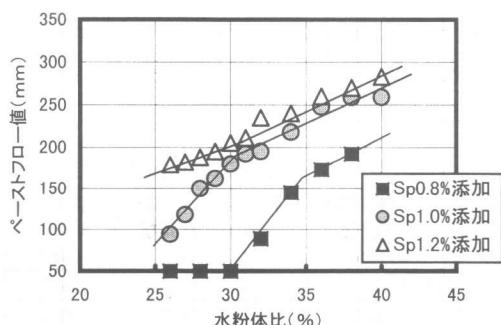


図-4 水粉体比とペーストフロー値の関係(フライアッシュBU)

は、水粉体比が0.26～0.28の範囲で、フライアッシュBUを用いた場合には0.30前後となつた。また、図-1に示したように、高性能AE減水剤添加量が増すと、屈曲点が低水粉体比側にシフトする傾向が認められた。さらに、同一水粉体比で同じペーストフロー値を得るための高性能AE減水剤添加量はフライアッシュの種類によって異なることが認められた。

図-5は、水膜厚さと図-3および図-4に示したペーストフロー値の関係を示したものである。これより、ペーストフロー値と水セメント比の関係は、屈曲点より低い水粉体比域では、フライアッシュの種類の影響を受けるが、屈曲点より大きな水粉体比域では、フライアッシュの種類による相違があまり見られないことが分かる。また、両者のフライアッシュを用いたペーストとともに、粉体粒子がかなり分散し、良好なセルフレベリング性を示すフロー値200～250mmでは、水膜厚さが約0.05～0.08μmで屈曲点が見られ、かつ屈曲点以上の水膜厚さでは、水膜厚さの増加に対するフロー値の増分がフライアッシュの種類が異なってもあまり変わらず、水膜モデルが成立しているのが認められた。しかし、図-2と比較すると、粉体の種類による差異が認められ、今後より詳細な検討が必要と考えられる。

4.2 コンクリートの自己充填性

(1) 流動性および粘性との関係

図-6に、スランプフロー値とU形充填高

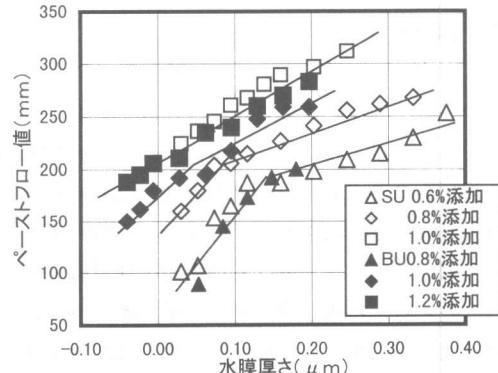


図-5 水膜厚さとペーストフロー値の関係

さの関係を示す。

単位粗骨材量が少ないためか、流动障害がR1と厳しいにも拘わらずス

ランプフロー値とU形充填高さとの間には直線関係が認められ、スランプフロー値が55cmまでは、スランプフロー値が大きくなるほどU形充填高さも増大し、自己充填性が向上するのが認められた。しかし、スランプフロー値が65cm以上になると、フライアッシュの種類によってU形充填高さとスランプフロー値の関係が異なり、コンクリートの流動性から一義的に自己充填性を評価できないことが認められた。

図-7に、V漏斗流下時間とU形充填高さの関係を示す。高流动コンクリートの自己充填性は、ペーストあるいはモルタルの粘性と相關があることが指摘されていたが、図-7の結果からはコンクリートの粘性を示すV漏斗流下時間とU形充填高さとの間には相関性が認められなかった。

(2) 水膜モデルによる自己充填性の評価

水粉体比と高性能AE減水剤添加量を変えた時のコンクリートのU形充填高さUhを30cm以上と未満とで区別し、自己充填性を示す領域を示したものを図-8に示す。なお、水粉体比が小さい場合は、V漏斗流下時間Vtが20秒以上でもU形充填高さが30cmを超えるものも確認されたが、ポンプ圧送などの施工性を考え

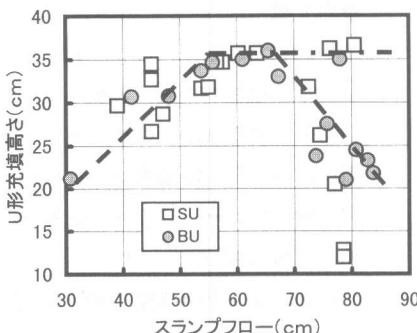


図-6 スランプフローとU形充填高さの関係

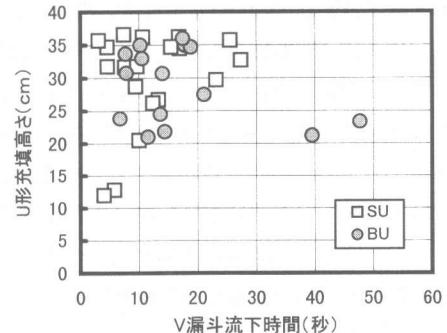


図-7 V漏斗流下時間とU形充填高さの関係

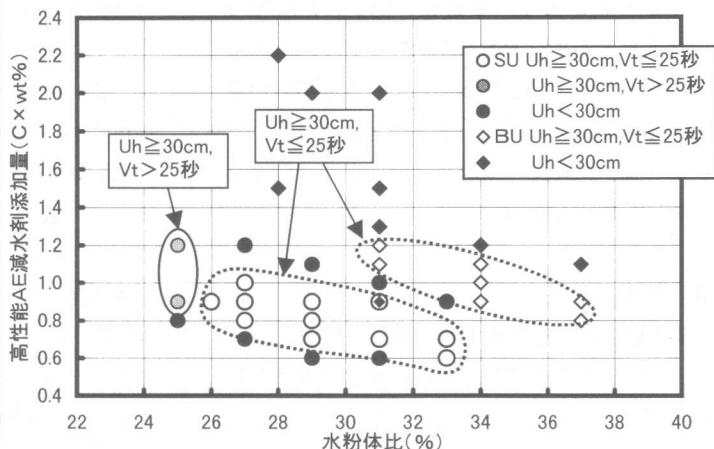


図-8 自己充填性を得るために必要な水粉体比と混和剤添加量の関係

ると、V漏斗流下時間は20秒を余り超えない方が良いと考えられ、本研究ではV漏斗流下時間が25秒を超えるものは自己充填性を示す領域から除外して考えることにした。

図より、明らかにフライアッシュの種類によって、自己充填性が得られる水粉体比の領域が異なり、SUの場合は水粉体比が0.25～0.33の範囲で、他方、BUの場合には水粉体比が0.31～0.37の範囲で自己充填性が得られた。なお、図-3および図-4に示した結果と比較すると、各混和剤添加量でのペーストフロー値と水粉体比の関係における屈曲点での水粉体比が、コンクリートが自己充填性を示す最小の水粉体比にほぼ対応していることが認められる。これより、水膜モデルにおける自由水量の増大から自己充填性を評価できると考えられ、図-5の結果との対応から、自己充填性を得られる

水膜厚さは約 $0.05\sim0.08 \mu\text{m}$ 程度と考えられる。

また、自己充填性を得るために必要な高性能 AE 減水剤添加量は、SU の場合 0.6~1.2% であり、BU では 0.8~1.3% と異なる結果を示した。しかし、図-3 および図-4 に示した結果と比較すると、いずれの場合も自己充填性を示す高性能 AE 減水剤添加量はペーストフロー値がほぼ 200~250 mm の範囲にあり、これより高性能 AE 減水剤の添加量も推定できるものと判断される。

以上の結果より、本研究で提案した粉体の充填性状と凝集を考慮した水膜モデルは、高流動コンクリートの水粉体比および混和剤添加量を推定する上で有効であるものと判断され、今後は各種の粉体での検討を行い、より一般的なモデルを構築したい。

5. 結論

本実験の結果を要約すると以下の通りとなる。

(1) ペーストの流動性は、凝集状態を考慮した水膜モデルで表わされることを明らかにした。

(2) コンクリートが施工性を損なわずに自己充填性を満足する水粉体比の最小値は、フライアッシュを用いた場合、粉体粒子表面が約 $0.05\sim0.08 \mu\text{m}$ の厚さの水膜で覆われた状態の水粉体比に相当し、粉体の充填率と比表面積が分かれば推定できることを示した。

(3) コンクリートが施工性を損なわずに自己充填性を満足する高性能 AE 減水剤の添加量は、ペーストフロー値が 200~250 mm になる範囲で得られることを示した。

謝辞

本研究は北海道電力（株）との共同研究の一環として実施したものである。なお、本研究に際して北海道大学鎌田英治教授からは終始熱心な御指導を頂いた。また、太平洋セメント（株）下山善秀氏、日鉄セメント（株）新崎義幸氏には実験装置および粒度分布測定でご協力頂いた。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岡村 甫ほか：ハイパフォーマンスコンクリート，技報堂出版，1993
- 2) 名和豊春ほか：高ビーライト系セメントを用いた高流動・高強度コンクリートに関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15, No.1, pp.143-148, 1993
- 3) 橋爪進、下川浩児：高性能 AE 減水剤の主成分がマトリックスモルタルの性状におよぼす影響、フレッシュコンクリートの流動性と施工性に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.7-12, 1996
- 4) 枝松伸展ほか：モルタルフロー値に及ぼす粉体特性の影響、コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, pp.77-82, 1994
- 5) 緑川猛彦、丸山久一：粉体の拘束水比に及ぼす粒子形状の影響、コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.1, pp.87-92, 1996
- 6) 内川浩ほか：まだ固まらないセメントペースト、モルタル、コンクリートの流動性に及ぼすセメントの粉末度及び粒子組成の影響、セメント・コンクリート論文集，No.43, pp.42-47, 1989
- 7) 小野寺収、名和豊春、荻原淳平：フライアッシュの品質が高流動コンクリートの性状に及ぼす影響、土木学会コンクリート技術シリーズ No.27, pp.77-82, 1997
- 8) Kenedy, C.T. : The Design of Concrete Mixtures, Proc. of ACI, Vo.36, pp.373-400, 1940
- 9) 緑川猛彦ほか：粉体特性の定量化に基づくペーストの流動性評価方法、土木学会論文集，No.592/V-37, pp.99-110, 1997
- 10) 皆口正一ほか：高流動コンクリートの材料分離測定方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18, No.1, pp.87-92, 1996
- 11) 加藤佳孝、魚本健人：セメントペーストの凝集構造がブリーディング現象に及ぼす影響、土木学会論文集，No.592/V-39, pp.121-129, 1998