

# 論文 フレッシュコンクリートにおけるモルタル部のレオロジー特性と流動性について

中西 博\*<sup>1</sup>・横山 滋\*<sup>1</sup>・柳田 力\*<sup>2</sup>

**要旨:**近年, 建設事業においては合理化, 環境保全, 資源有効利用が叫ばれている中, ダム建設現場においても低品位骨材や多量に発生する骨材微粒分の利用が強く望まれるなどコンクリート品質を取り巻く環境が変化している。本研究では, ダム用コンクリートのフレッシュ性状を左右するモルタルの流動性について, レオロジー的な観点から検討したものである。その結果, モルタルの流動性についてはレオロジー定数によって評価できることが明らかとなり, レオロジー定数は細骨材の粒度分布, 細かさとモルタルの配合などにより影響されていることが解った。

**キーワード:**レオロジー特性, ダム用コンクリート, 流動性, 余剰ペースト膜厚

## 1. はじめに

一般に, ダム建設に使用される骨材は, 建設現場に近い原石山を選定し, 入手可能な範囲で緻密で堅硬なものが選定・採掘されて製造される。一方, ダム建設においては環境保全, 資源の有効利用, 工事費増加の抑制などの合理化の観点から使用可能な骨材範囲を拡大するとともに骨材微粒分をより多く有効利用することがますます強く望まれている。そのような中, 従来ではダム用コンクリートの配合設計方法には粗骨材かさ容積などの基本的理念をもとに行っているが, この他に柳田ら<sup>1)</sup>, 島津ら<sup>2)</sup>の報告では, ダムコンクリートを対象として細骨材微粒分 (0.15mm 以下) を多く用いた場合のフレッシュコンクリートの性状について検討されており, 標準示方書に示されている細骨材標準粒度における 0.15mm 以下の上限を拡大し得る可能性が示唆されている。近年では, ダム建設に使用される良質な骨材の確保が難しくなるとともに品質は低下する傾向にあり, 歩留まり (原石使用量/全採掘量×100%) も 50%程度といわれ, さらにコンクリートの連行空気量の減少, VC 値の増加など骨材品質の影響と考え

られるフレッシュ性状の異常が認められる場合も生じている。この様にコンクリート品質を取り巻く状況は変化し, 骨材品質の判定基準をより明確にすること, 要因を定量的に評価することが求められている。

コンクリートのフレッシュ性状は細, 粗骨材の形状や粒度分布, 吸水また, 配合によって大きく影響を受ける。現在までに様々な研究により配合による影響はある程度把握することが可能となっている。しかし, コンクリート性状を最も大きく左右するモルタルの性状, すなわち, 比表面積の大きい細骨材のキャラクター (「細かさ」, 「粒度分布」, 「鉱物の物理化学的吸着特性」) が及ぼす影響について検討された例が少なく, コンクリートの性能を規定する上でモルタル性状を解析することが重要である。

本研究では, コンクリート性状および骨材また骨材のキャラクター解析を行うに先立ち, モルタルの流動性について, 細骨材の基本的構成要因である「細かさ」, 「粒度分布」が流動性に与える影響をレオロジー (塑性粘度, 降伏値) 的な観点から解析・検討を行った。

\*1 太平洋セメント (株) 研究本部 佐倉研究所 (正会員)

\*2 (財) 土木研究センター 顧問 (正会員)

## 2. 試験概要

本研究ではRCD用からダム用有スランプコンクリート配合までを範囲とし、モルタルの流動性の一特性であるモルタルフローを選定し、レオロジー定数の測定を行い、解析した。また、併せてコンクリートの配合設計に適用可能と考えられる「余剰ペースト膜厚理論」と比較し、本試験の有用性を検討した。なお、「余剰ペースト膜厚理論」については後述する。

### 2.1 使用材料および試験項目

セメントは、現在、RCDダム建設に多く利用されている中庸熟フライアッシュセメント（密度  $2.85\text{g/cm}^3$  (F/C+F)=0.3），混和剤にはリグニンスルホン酸系のAE減水剤（ $C \times 0.25\%$ ），細骨材には、鉱物種の影響を取り除くため表-1のように粒度調整した珪砂（密度  $2.60\text{g/cm}^3$ ），練り混ぜ水には、熊谷市水道水を用いて試験を行った。

### 2.2 配合および練り混ぜ方法

表-2に配合を示し、表-1と2との組み合わせ（20種類）について試験を行った。なお、モルタルの練り混ぜには、ホバートミキサを用いて、セメント、細骨材を投入し、空練り30秒、水投入後低速1分、かき落とし、中速2分で排出し、試料とした。

### 2.3 試験項目および方法

試験項目は、モルタルの流動性の指標としてモルタルフロー値（JIS R 5201）と、音叉型振動式粘度計（図-1）による塑性粘度（Pa·s）と降伏値（Pa）を測定し、各々に及ぼす影響因子について検討した。

### 2.4 余剰ペースト膜厚の算出方法

余剰ペースト膜厚理論は、Kennedy, Powers<sup>3)</sup>らによって提唱されたものであり、「コンクリートを骨材とセメントペーストの2相材料と考え、最充填状態の骨材間空隙がセメントペーストで充填された後、余剰のセメントペーストが存在することにより骨材粒子表面にペースト膜を作って骨材が分散され、コンクリートに流動性が与えられる。」とする考え方である。

表-1 粒度調整砂

番号	各粒径 (mm, %)					
	0.15以下	0.3以下	0.6以下	1.2以下	2.5以下	5.0以下
1	10	15	23	28	19	5
2	10	18	20			
3	7	15	26			
4	7	18	23			
5	12	13	23			

表-2 配合

配合番号	S/C(容積比)	W/C(質量比)
①	5.9	0.85
②	5.0	0.75
③	4.0	0.64
④	3.0	0.53

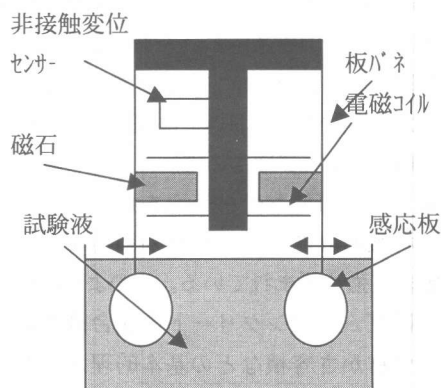


図-1 音叉型振動式粘度計略図

本試験においては、近田ら<sup>4)</sup>により報告されている計算方法により以下の要領で余剰ペースト膜厚を計算した。

- ①実積率などより余剰ペースト量を算出する。
- ②角ばり係数などにより修正し、骨材の表面積を算出する。
- ③余剰ペースト量、表面積、単位細骨材容積から求めた。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 レオロジー定数に及ぼす影響因子の検討

各種配合でのレオロジー定数に及ぼす影響

をそれぞれ、図-2, 3に示す。図-2よりレオロジー定数である塑性粘度は、モルタル中に占める細骨材中の0.15mm以下容積割合の増加により塑性粘度も増加し、富配合であるほど0.15mm以下容積割合の変化に敏感である。0.15mm以下粒子は、レオロジー定数に大きく影響し、微粉末として取り扱うのが適当であると思われる。すなわち、呉ら<sup>5)</sup>の研究によるとレオロジー定数は、セメントの比表面積に左右され、比表面積が高くなると吸水率が増加し、余剰水膜が薄くなるためレオロジー定数は増加すると報告されており、0.15mm以下粒子を微粉末として取り扱うことにより比表面積の変化に伴う粘性への影響について考慮する必要があると思われる。塑性粘度は、細骨材中の0.15mm以下粒子添加量や細骨材の容積割合によって影響を受けるものである<sup>6)</sup>。通常、セメントペーストの場合には、セメントの種類、水セメント比の影響で、低粘度であるほど流動性は大きいとされているが、細骨材を含むモルタルの流動性は、粗粒子割合(0.15mmより粗粒)の影響が多めで骨材の噛み合わせがあると考えられるため、セメントペーストの粘性だけでは決定されない。そこで塑性粘度と負の相関がある粗粒子容積と正の相関があるペースト容積の比率(PV値=粗粒子容積/ペースト容積)を指標として流れやすさに対する抵抗性として表わせるものと思われる。

図-3に示すようにレオロジー定数である降伏値は、余剰ペースト体積とよい相関が認められる。ここでいう余剰ペースト体積とは細骨材を占め固めできた空隙(1-実積率)にペーストを充填した後に余ったペーストの容積であると定義し、言い換えればモルタルの流動に寄与することのできるペースト量であるといえる。以下に余剰ペースト体積の算出式を示す。

余剰ペースト体積=

$$P - \{(1000 - P) \times (1 - (G/100))\}$$

ここで、Pはモルタル中のペースト(セメント、水、細骨材中の0.15mm以下の含量)の占める容積

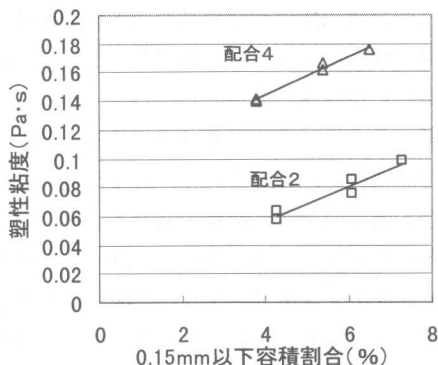


図-2 塑性粘度と0.15mm以下容積割合の関係

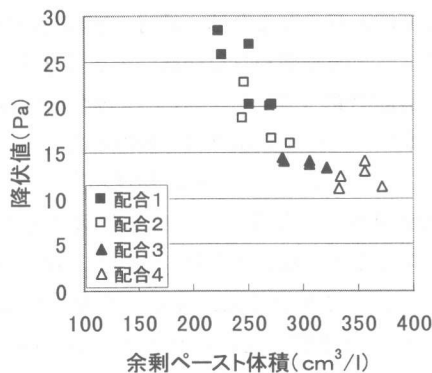


図-3 降伏値と余剰ペースト体積の関係

であり、Gは、細骨材(0.15mm以上の細骨材)の実積率である。

降伏値とは、モルタルなどに応力を与えたときに変形を始めるのに最低限必要な応力値であるため、モルタルの降伏値には骨材の粒度分布(実積率、噛み合わせなど)やペースト部の粘度が影響するものと考えられる。そこで、降伏値は、余剰ペースト体積と「変形=流動」の指標である塑性粘度とで表す(YV値=余剰ペースト体積×塑性粘度)ことができるとと思われる。

### 3.2 モルタルフロー値に及ぼす影響因子の検討

モルタルフロー値とレオロジー定数の関係を図-4, 5に示す。

図-4より、モルタルフロー値は、降伏値が

大きくなるにしたがって小さくなり、両者間には良好な相関関係が認められる<sup>5)</sup>。降伏値は、骨材の噛み合わせなどの影響を多大に受けていることが確認できる。

図-5より、モルタルフロー値は、塑性粘度の増加に伴い、大きくなり、ある付近より小さくなる上に凸な関係が認められる。そこで、参考としてS/C=2時のデータを図-5中に追加した。RCDダム用コンクリート配合などのように貧配合、高W/Cにおいてはモルタルが分離する傾向（ペースト量は不足し、低粘性のため）を示し、モルタルが流動しにくく、フロー値が小さくなる。配合が富配合になるに従い、塑性粘度は大きくなるため、骨材の噛み合わせが緩和され、モルタルフロー値は大きくなる。さらに富配合になるとペーストの塑性粘度は大きく増加し、モルタルフロー値は小さくなるものと思われる。このように、塑性粘度もまた、降伏値同様にモルタルフロー値に大きく影響を与えることが確認された。RCDダム用コンクリート配合においては、流動性を確保する上で0.15mm以下粒子を含めたペーストの粘性を制御することが必要であり、図-5中の塑性粘度が0.25(Pa·s)付近でフロー値は最大を示し、その付近の配合はS/C=2程度である。なお、現在多くの研究がなされている高流動コンクリート配合(W/Cや使用混和剤(材)等により変化する)の、S/Cは1~2程度と小さなものであり、塑性粘度の増加とフロー値の関係については今後、検討の余地があるものと思われる。

モルタルフロー値は、ダム用コンクリート配合(貧配合、高W/C)においては、正相関のある塑性粘度と負相関のある降伏値の比(M値=(塑性粘度/降伏値)×100)を指標に表すことができると思われる。

図-6~8に、レオロジー定数およびモルタルフロー値と、PV値、YV値およびM値との関係をそれぞれ示す。図-6~8より、それぞれ良好な相関関係が認められ、塑性粘度は粗粒子

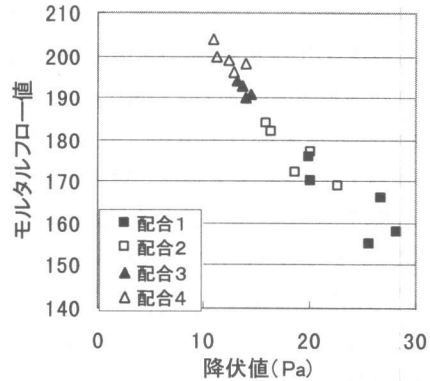


図-4 モルタルフロー値と降伏値の関係

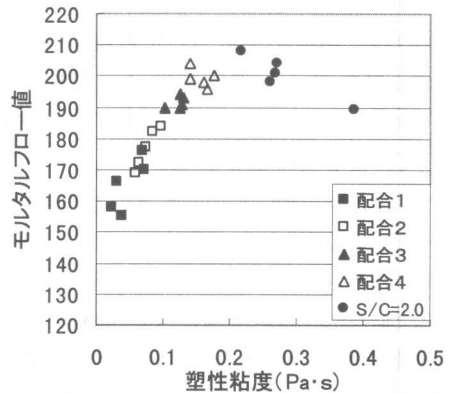


図-5 モルタルフロー値と塑性粘度の関係

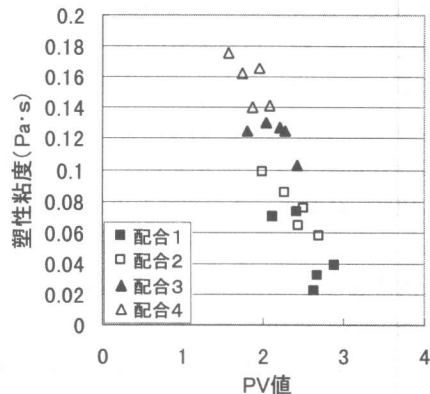


図-6 塑性粘度とPV値の関係

容積とペースト容積の比率(PV値)により推定することができ、降伏値は余剰ペースト体積と塑性粘度(YV値)により推定することが可能と考えられる。また、モルタルフロー値はレオロ

ジ一定数である塑性粘度，降伏値より推定することが可能であり，それぞれに影響を与える因子について確認することができた。

### 3.3 レオロジー定数，モルタルフロー値と余剰ペースト膜厚との関係

本試験で行ったように貧配合，高W/C時の配合の余剰ペースト膜厚とレオロジー定数およびモルタルフロー値との関係について図-9～11に示す。

その結果，図-9～11に示すように，余剰ペースト膜厚は，レオロジー定数およびモルタルフロー値と良好な関係が見出せた。これは，レオロジー定数（降伏値，塑性粘度）が0.15mm以下粒子を微粒分として取り扱うことや材料，配合特性の影響を受けているためであり，余剰ペースト膜厚を算出する際にもレオロジー定数と同様な因子に影響を受けているため，本試験範囲のような貧配合，高W/C時には，粘性が極端に変化しにくい状態であり，また，影響度合いが小さいため良好な関係が得られたものと思われる。

一般に，モルタルフロー値と余剰ペースト膜厚の関係は直線とされているが，図-11に示すように，膜厚が厚くなると直線関係からのずれが認められる。これは，「余剰ペースト膜厚理論」ではセメント粒子自体の粉末度に代表されるような「細かさ」の違いによる粘性値の変化の影響については計算過程において特に考慮していないためと思われる。

「余剰ペースト膜厚理論」では，ペーストのレオロジー定数（塑性粘度，降伏値）に大きく変化が認められるような極端な富配合，低W/Cおよび混合材（剤）の使用時などでは，モルタルの流動性を説明することが難しくなるものと思われ，本結果のような材料，配合特性など固有値により評価することがより望ましいと思われる。

## 4. まとめ

モルタルの流動性の一特性であるモルタル

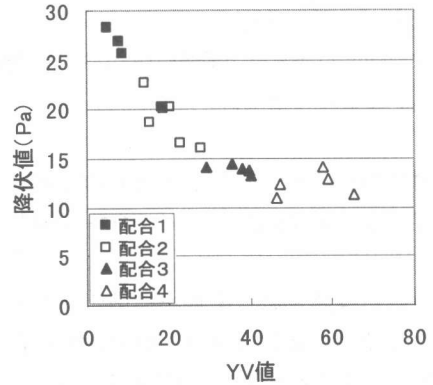


図-7 降伏値とYV値の関係

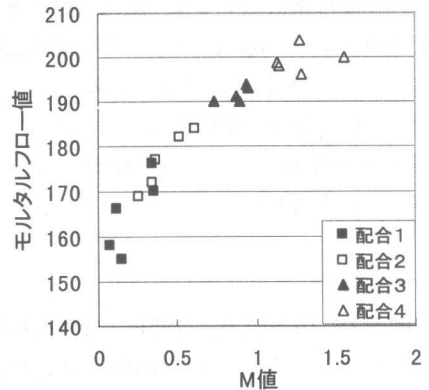


図-8 モルタルフロー値とM値の関係

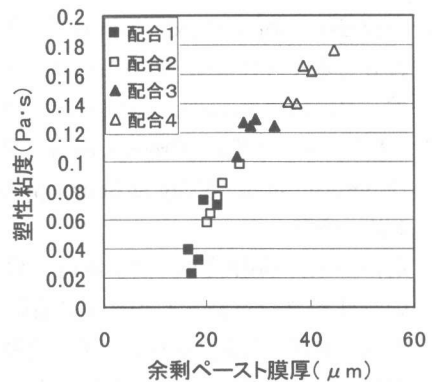


図-9 余剰ペースト膜厚と塑性粘度の関係

フロー値は，材料，配合特性による固有値（細骨材の粒度分布（実積率），0.15mm以下の添加量，配合など）を測定することにより推定することが可能である。これは，レオロジー定数，

PV 値, YV 値などのファクターにより説明できることが確認できた。

よって、以下に示す過程でモルタルの流動性について評価できる。

材料特性, 配合特性など固有値の測定 → 塑性粘度, 降伏値推定 → フロー値推定

これら確認された関係を標準データとし, 様々な要因を変化させたときの影響度合いを定量化することにより, RCD 用コンクリートへの影響についての一助となれることと思われる。今後は微粉末中のより細粒 (数  $\mu\text{m}$ ) 部および微粉末 (0.15mm 以下) 含有量の上限やモルタルフローとコンクリートのコンシステンシーとの直接的な関係について, また, より広範囲への適用などについて検討していく必要があると思われる。

【参考文献】

- 1) 柳田力, 山本辰夫, 日向正: 細骨材の微粒子がダムコンクリートのワーカビリティに及ぼす影響, 第 49 回セメント技術大会講演集, pp306-311, 1995
- 2) 島津義郎, 葉師寺公文, 加納芳紀: 骨材微粒子を多く含む RCD 用コンクリートの特性, ダム技術 No.101. pp24-31. 1995
- 3) T.C.Powers: The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons, pp121-124. 1968
- 4) 近田孝夫, 前田悦孝, 松下博通: 細骨材の物性がフレッシュモルタルの流動性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol14. No.1. pp387-392. 1992
- 5) 呉承寧, 今井昌文, 手塚正道: フレッシュモルタルのレオロジー定数に及ぼす使用材料及び配合の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol19. No.1. pp379-384. 1997
- 6) 吉野公, 西林新蔵, 黒田保: 混和材料およ

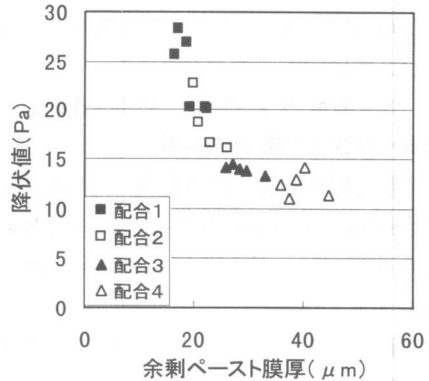


図-10 余剰ペースト膜厚と降伏値の関係

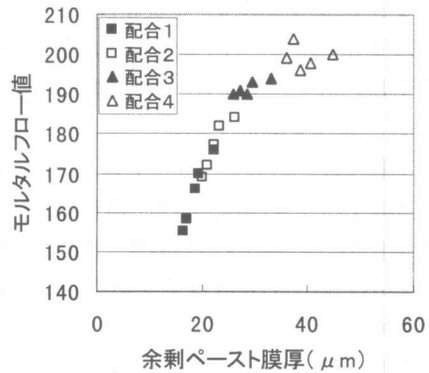


図-11 余剰ペースト膜厚とフロー値の関係

び細骨材の性質がモルタルの塑性粘度に及ぼす影響, 土木学会第 49 回年次学術講演会, pp192-193. 1994