

## 論文 使用材料の物性に基づいた高流動コンクリートの調合設計理論

松田 陽介<sup>\*1</sup>・名和 豊春<sup>\*2</sup>

要旨：粉体系高流動コンクリートの調合設計の合理化には、使用する材料の品質および単位量が流動性に及ぼす影響を定量的に評価することが重要となる。本論文では、既往のペースト性状の推定モデル<sup>1)</sup>に細骨材および粗骨材がコンクリート性状に与える影響を評価するモデルを組み入れ、使用材料の品質を総合的に反映した調合設計理論の構築を目指した。モデルの検証実験より、任意の材料から構成されるコンクリートの流動性(スランプフロー、V漏斗流下時間および自己充填性)を使用する材料の基本的物性および単位量から推定できる可能性が示唆された。

キーワード：調合設計、流動性、水膜モデル、余剰ペースト理論、粒子間隔モデル

## 1. はじめに

近年、環境問題に対する意識の高まりから、様々な産業で資源の有効活用が盛んに取り組みられている。コンクリート分野では、フライアッシュや廃コンクリートの再生処理過程で大量に発生する微粉末等を、混和材料として高流動コンクリート(粉体系)に有効活用することが注目されている。しかし、これらの微粉末は品質が変動しやすいという特徴を有しており、これらを使用したコンクリートの流動性を変動させてしまう。このため、調合決定にさいして数多くの試し練りを要すといった作業の煩雑化が指摘されており、高流動コンクリートの調合設計の合理化が大きな課題となっている。ここで、任意の材料を使用したコンクリートの流動性を試し練りすることなく推定可能であるならば、調合設計の合理化に大きく資すると考えられる。以上から、本研究ではコンクリートに使用する材料の品質が流動性に及ぼす影響を定量的に評価できる調合設計理論の構築を目的とした。なお、本論文の調合設計理論は、フレッシュコンクリートの流動性の評価を目的としている。

## 2. 調合設計理論の概要

図-1に、コンクリート性状とコンクリート中のペースト性状およびモルタル性状とコンクリート性状の関係を示す。前述の微粉末によるコンクリートの流動性の変動は基本的にはペースト性状が変化することに起因する。よって、第一に粉体性状が変動した時のペースト性状を定量的に評価することが必要である。また、再生骨材の利用も考慮すると、コンクリート性状の評価には細骨材および粗骨材の品質が流動性に及ぼす影響も考慮する必要がある。調合設計の最終目標であるコンクリート性状の推定項目としては、フレッシュコンクリートの変形性と関連するスランプフロー、材料分離抵抗性と関連するV漏斗流下時間、自己充てん性と関係するU型充てん高さの3項目とした。ペースト性状の推定モデルとして、太田<sup>1)</sup>の提案する水膜モデルを使用した。細骨材および粗骨材がコンクリート性状に及ぼす影響の評価モデルとしては、スランプフローの推定には余剰ペースト理論、V漏斗流下時間の推定には粒子間隔モデルを用いた。次章に各モデルの概要を述べる。

\*1 北海道電力株式会社 土木部 建築グループ (正会員)

\*2 北海道大学大学院 工学研究科助教授 工博 (正会員)

### 3. 推定モデルの概要

#### 3.1 水膜モデル

太田<sup>1)</sup>は、水粉体比とペースト性状の変化をペースト中の水の存在形態の違いから説明している。図 - 2 に水膜モデルの概要を示す。図に示すようにペースト中の水の状態を 3 つに区分される。図の A の領域では、粉体粒子の空隙に水が充填されペーストは流動しない。粉体粒子間の空隙を完全に満たすのに要する水量を粉体充填拘束水  $W_0$  と定義する。 $W_0$  よりさらに水を加えていくと、ペースト状に変化し水量の増加に伴い流動性を増す。この状態を B とする。領域 B では、粉体粒子の表面に水が付着し水膜を形成する。この時に添加される水を  $W_f$  とし、水粉体比の増加に伴い水膜厚さが増し流動性が向上していく。ただし、高性能 AE 減水剤が十分に添加されていない場合は、粉体粒子が凝集体を形成しその内部に水を収蔵すると考えられる。この水を凝集内部拘束水  $W_n$  と定義し、 $W_n$  は流動性に寄与しないとする。さらに水を加えると、水膜厚さは増すが、水を粒子表面に保持できなくなる状態、換言すると水膜厚さが最大の状態が存在する。この水膜厚さが最大を超えた状態を領域 C とする。この時、ペーストからフリーディング水  $W_b$  が発生する。水膜モデルでは、凝集体を形成している粒子の表面にも均一な水膜を有すと仮定しており、水膜厚さは式(1)より算出される。

$$t = \frac{W_f}{\rho_w \cdot BL \cdot W_p} \times 10^4 \quad (1)$$

ここに、 $t$  : 水膜厚さ( $\mu\text{m}$ )  
 $\rho_w$  : 水の密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ )  
 $W_p$  : 粉体の質量( $\text{g}$ )  
 $BL$  : 粉体の比表面積( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

太田らは、フライアッシュを用いてモデルの妥当性の検討を行った。その結果、ペーストフロー値を水膜厚さ、高性能 AE 減水剤添加量およ

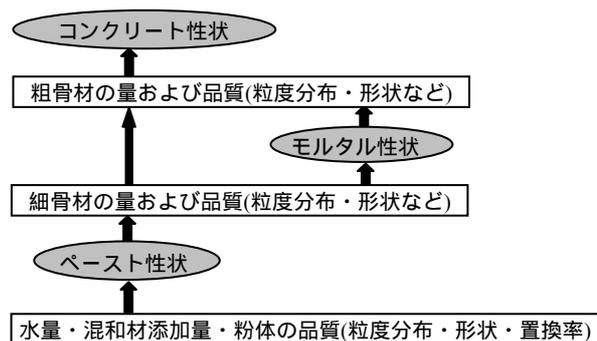


図 - 1 コンクリートの各性状に及ぼす影響因子

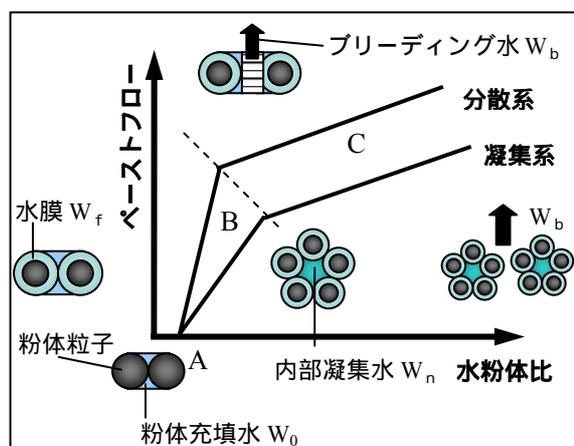


図 - 2 水膜モデル模式図

びフリーディング水量の関数で表せることを明らかにした。

$$F_p = A \cdot t + B \cdot SP + C \cdot W_b \quad (2)$$

ここに、 $F_p$  : ペーストフロー値  
 $SP$  : 高性能 AE 減水剤添加率(%)  
 $A, B, C, D$  : 実験定数

なお、式(2)の実験定数は使用する粉体の種類および練り混ぜ条件等により変化する。

以上、水膜モデルより粉体の性状が変化した場合でも、ペースト性状を充填率、比表面積といった粉体の基本的な物性値を用いて推定できることが示唆される。

#### 3.2 余剰ペースト理論によるスランプフローの推定

余剰ペースト理論では、コンクリートもしく

はモルタルをペーストと骨材の二相系と捉え、骨材の表面を覆うペーストの厚さによって流動性を評価する。図 - 3 に余剰ペースト膜厚の概念を示す。図の(A)は、骨材が充填された棒つき実積率試験の状態を示している。(B)は、(A)の骨材間の空隙にペーストが充填されている状態である。(C)は、骨材間の空隙を充填する以上のペーストがさらに加えられた状態を示している。(C)以降加えられたペーストは骨材表面に付着しペースト膜を形成する。このペースト膜を形成するペーストを余剰ペースト  $V_e$ 、膜の厚さを余剰ペースト膜厚  $\delta_p$  という。図 - 4 に余剰ペースト理論を用いたコンクリートのスランプフローの推定モデル(コンクリート  $1\text{m}^3$  当たり)および  $V_e$  の算出方法を示す。モデルでは、コンクリートを流動性に寄与しないと仮定した空気量  $V_a$  および粗骨材と粗骨材に付着するペースト  $V_g+V_{gp}$  と、流動性に寄与すると仮定した細骨材と残りのペースト部分で形成されるモルタル  $(1-V_a-V_{gp})$  の3つの部分に分割し、余剰ペースト体積  $V_e$  の算出を行っている。またモデルでは、粗骨材形状を長短比を有する楕円体と仮定し、粒子径として平均径を用いた。粗骨材に付着するペースト体積は、既報<sup>2)</sup>より算出した。 $\delta_p$  は、 $V_e$  を細骨材の比表面積で除して、式(3)のように与えられる。

$$\delta_p = \frac{V_e}{V_s \cdot S_s} \times 10^6$$

$$= \frac{V_e}{(1-V_a-V_g) \cdot S_c \cdot S_s} \times 10^6 \quad (3)$$

ここに、 $S_s$  : 細骨材比表面積( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )  
 $S_c$  : 細骨材容積比

松下ら<sup>3)</sup>によると、モルタルフローは余剰ペースト膜厚  $\delta_p$  を細骨材の粒度分布より算出される面積体積平均径  $d_a$  で除した余剰ペースト膜厚比  $\delta_p/d_a$  より一義的に評価されるとしている。面積体積平均径の算出は徳光<sup>4)</sup>の方法を用いた。本モデルでも、この余剰ペースト膜厚比を用

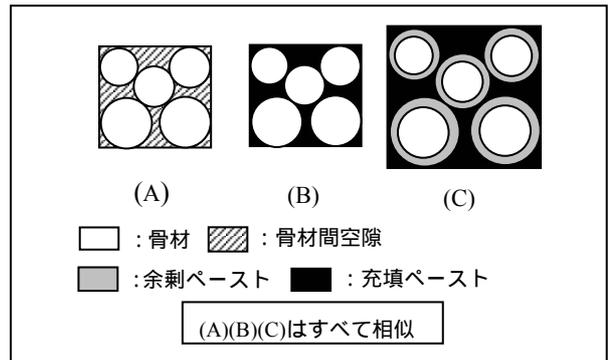


図 - 3 余剰ペースト理論の概念

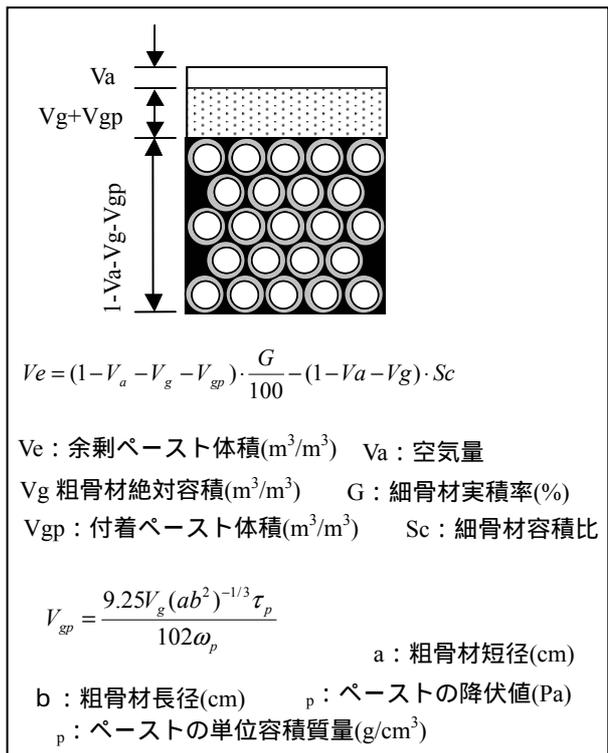


図 - 4 スランプフロー推定モデルの概要

いてスランプフローの推定を試みる。

3.3 粒子間隔モデルによるV漏斗流下時間の推定  
 モデルでは、V漏斗流下時間は、漏斗の吐出口付近の粗骨材の粒子間隔によって決定されるとした。すなわち、粒子間隔が狭まるほど粒子同士の接触割合が増大するためV漏斗流下時間が増加し、逆に粒子間隔が大きい場合は粒子間の接触が緩和され流下時間は減少すると仮定される。

図 - 5 に粒子間隔モデルの概要(図はコンクリート  $1\text{m}^3$  あたり)および粒子間隔  $L$  の算出方法を示す。粗骨材は、スランプフローの推定モデルと同様に扱う。なお、

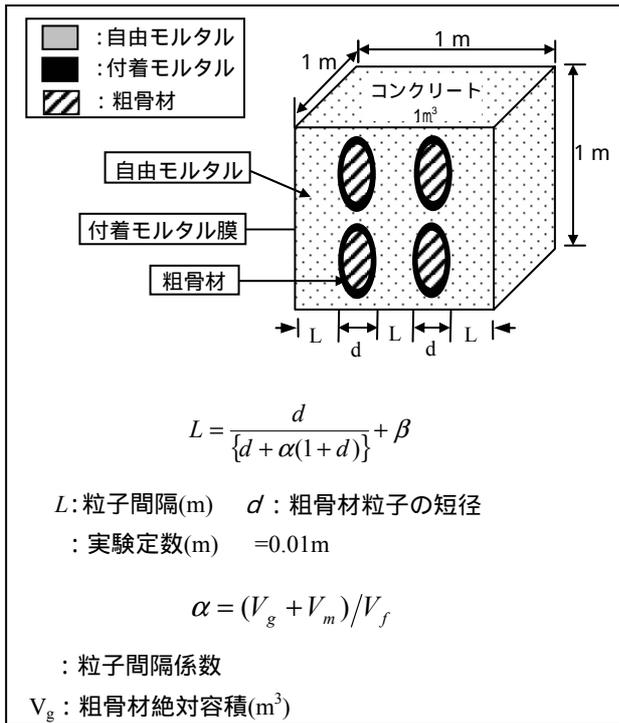


図 - 5 V 漏斗流下時間推定モデル

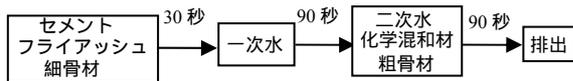


図 - 6 コンクリートの練混ぜ方法

粗骨材に付着したモルタル厚さを算出するのは計算が煩雑となるため、図中の  $d$  と近似して粒子間隔  $L$  を算出した。付着モルタル体積もモデルと同様に既報<sup>2)</sup>に基づいて算出した。この時、モルタルの降伏値を求める必要があるが一般に余剰ペースト理論を用いて推定することが可能である<sup>3)</sup>。

#### 4. 実験

##### 4.1 使用材料およびコンクリートの作製

前章で述べたモデルの妥当性を実験にて検証した。実験に使用した材料の物性値を表 - 1 に示す。フライアッシュは、北海道電力(株) 苫東厚真発電所 2 号機ボイラーから産出された海外炭フライアッシュを用いた。フライアッシュは、セメント内割で置換し、置換率は容積で 50%とした。コンクリートの調合は、単位粗骨材絶対容積  $V_g$  および細骨材容積比 (単位細骨材絶対容積/モルタル容積) をそれぞれ表 - 2 のように変

表 - 1 使用材料の物性

材料名		諸元	
普通ポルトランドセメント		密度 3.16g/cm <sup>3</sup> フレン比表面積 3360cm <sup>2</sup> /g	
フライアッシュ		PR/BA炭(強熱減量 1.8%、メチレンフルー吸着量 0.64mg/g、密度 2.13g/cm <sup>3</sup> 、フレン比表面積 2790cm <sup>2</sup> /g、充填率 57.3%)	
骨材	細骨材	陸砂	表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup> 、単位吸水率 2.13%、FM2.48、実積率 65.5%、比表面積 334cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup>
		川砂	表乾密度 2.62g/cm <sup>3</sup> 、単位吸水率 2.73%、FM3.09、実積率 69.0%、比表面積 408cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup>
		砕砂	表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> 、単位吸水率 2.01%、FM2.84、実積率 62.7%、比表面積 560cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup>
	粗骨材	砕石	表乾密度 2.68g/cm <sup>3</sup> 、単位吸水率 1.44%、FM6.84、実積率 59.3%
混和剤	高性能AE減水剤	ホリカルホン酸エーテル系と架橋ホリマーの複合体	
	AE剤	高アルキルカルホン酸系陰イオン界面活性剤 + 非イオン系界面活性剤	

表 - 2 実験ケース

細骨材の種類	水粉体比 W/P(%)	高性能AE減水剤 添加率Sp/P(%)	単位粗骨材絶対容積Vg(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	細骨材容積比Sc
陸砂	32.4	1.5	0.25	0.35~0.50
			0.28	0.35~0.50
			0.30	0.35~0.47
		1.7	0.25	0.35~0.53
			0.28	0.35~0.52
			0.30	0.35~0.51
川砂	1.9	0.25	0.40~0.55	
		0.28	0.38~0.55	
砕砂	1.7	0.30	0.35~0.45	0.33~0.41

化させた。細骨材は、粒度・形状の異なる 3 種類を使用した。空気量は、AE 剤を用いて  $6 \pm 1\%$  に調節した。コンクリートの練混ぜは、岡村らの方法<sup>5)</sup>に準じ、図 - 6 に示す投入順序で行った。なお、一次水と二次水の比は、8 : 2 とした。ミキサは公称容量 55L の強制 2 軸ミキサを用いた。

##### 4.2 測定項目および方法

###### (1) コンクリート性状の測定

スランプフロー試験，V 漏斗流下試験 (吐出口形状 65 × 75mm)，U 型充填試験はいずれも土木学会「高流動コンクリート施工指針」に準じて行った。U 型充填試験の流動障害は R1 とし、充填高さ 30cm 以上で自己充填性を有すると判定した。

###### (2) モルタル性状の測定

モルタルの降伏値は、回転粘度計 (HAAKE 社製 RS150, 羽根型ロータ) を用いて応力制御方式 (最小応力 0.03Pa) にて測定した。

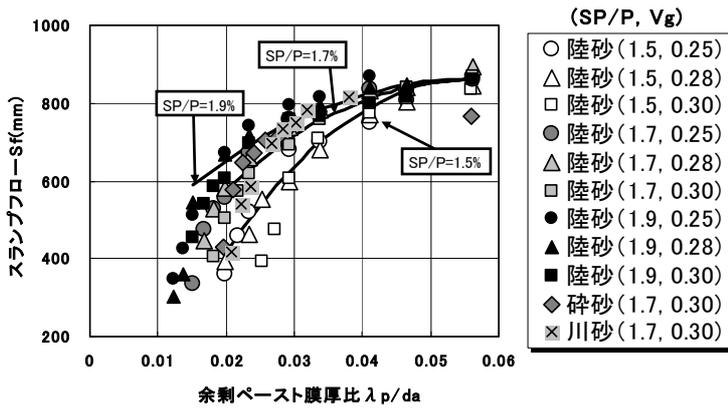


図-7 余剰ペースト膜厚比とスランプフローの関係

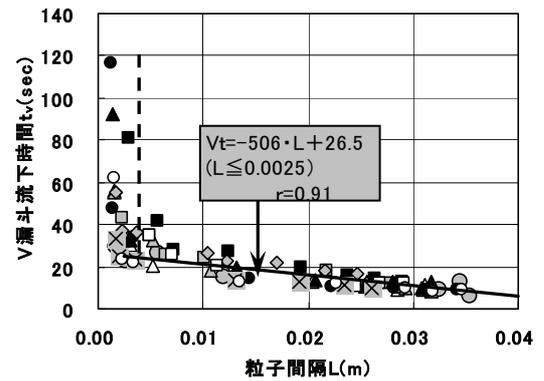


図-8 粒子間隔LとV漏斗流下時間の関係

## 5. 実験結果および考察

### 5.1 モデルの妥当性の検証

図-7に余剰ペースト膜厚比とスランプフロー-Sfの関係を示す。図より、全ての配合において、細骨材の種類、単位粗骨材絶対容積  $V_g$  に拘わらず、ペースト性状で層別できることが認められた。また、図-7に示したペースト性状ごとの回帰曲線は、高流動コンクリート推奨範囲外の  $Sf=500\text{mm}$  以下の点を除いて、最小二乗法により求めたものである。回帰曲線は、式(4)で表わされる。なお、回帰式の標準偏差は、高性能 AE 減水剤添加量 SP/P の低い順に、25mm、30mm、38mm となった。

$$Sf = -\gamma \cdot \left( 55 - 1000 \cdot \frac{\lambda_p}{da} \right) + 860 \quad (4)$$

ここに、Sf：スランプフロー(mm)

γ：ペースト性状による係数

$\lambda_p$ ：余剰ペースト膜厚(μm)

da：細骨材の面積体積平均径(μm)

$$\gamma = -0.0384 \cdot F_p + 11.6 \quad (5)$$

ここに、Fp：ペースト性状による係数

Fp：ペーストフロー(mm)

これより、Sf は余剰ペースト理論を用いて、ペースト性状、細骨材の品質および単位量、粗骨材の形状および単位量から推定できることが

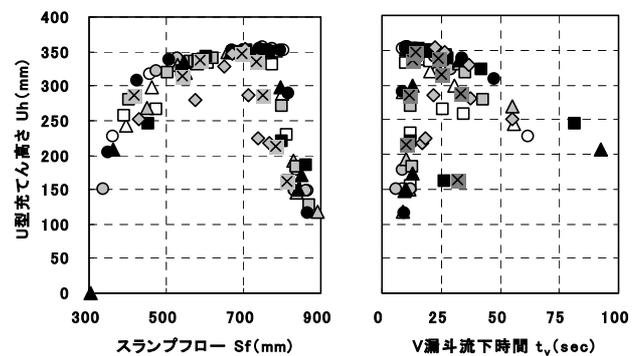


図-9 スランプフローとU型充てん高さの関係 図-10 V漏斗流下時間とU型充てん高さの関係

明らかとなり、モデルの妥当性が示された。

図-8にV漏斗流下時間  $t_v$  と粒子間隔Lの関係を示す。図より、V漏斗流下時間  $t_v$  と粒子間隔Lには、単位粗骨材絶対容積  $V_g$  やモルタル性状に拘わらず高い相関が認められ、粒子間隔Lが小さくなるほどV漏斗流下時間が増大し、ある値を超えると急激に増加する傾向が認められる。屈曲する以前の実験値の回帰式を式(6)に示す。回帰式の標準偏差  $t_v$  は、2.43秒であった。

$$t_v = -719 \cdot L + 25.8 \quad (6)$$

ここに、 $t_v$ ：V漏斗流下時間

L：粒子間隔(m)

これより、粒子間隔モデルを用いてV漏斗流下時間を精度良く推定できることが明らかとなり、モデルの妥当性が示された。

## 5.2 自己充てん性と各コンクリート性状の関係

図 - 9 および図 - 10 にそれぞれU型充てん高さ  $U_h$  とスランプフロー  $S_f$  および V 漏斗流下時間  $t_v$  の関係を示す。今回の実験条件では、 $U_h$  と  $S_f$  には相関が認められ、砕砂を除くと 500  $S_f$  700 にて  $U_h$  が 300mm 以上となっている。しかし、自己充てん性が確実に得られる  $S_f$  の範囲として安全側を考慮して全ての配合にて自己充てん性が得られた 600  $S_f$  700 と設定することが妥当であると考えられる。図 - 10 より、今回の実験条件では  $t_v$  が 10 秒程度までは、 $t_v$  が増加するに従い  $U_h$  が増大し、 $t_v$  が 20 秒程度になると減少する傾向が見られた。しかし、自己充てん性が得られる V 漏斗流下時間の範囲を本実験の結果から導き出すのは不可能であった。一般に  $t_v$  は、材料分離抵抗性や施工性を考慮して 4  $t_v$  20 秒が適切であるとされている<sup>6)</sup>。本論もこれにならうこととした。

## 6. 調合設計理論の提案

これまでの成果を踏まえて、スランプフロー、V 漏斗流下時間の推定に要する物性値および単位量を図 - 11 にまとめる。なお、自己充てん性の判定基準は前節の結果に基づいた。図は、理想状態の流動性の推定の流れを示したものであり、フィードバック等は考慮されていない。

## 7. まとめ

水膜理論によるペースト性状の評価に加えて、細・粗骨材が評価を余剰ペースト理論によるスランプフローの推定および粒子間隔モデルによる V 漏斗流下時間の推定を行うことにより、使用材料の基本物性値および単位量からコンクリート性状を推定できることが示唆された。なお、今後、粗骨材の形状の相違についてモデルの検討を要すると考えられる。

## 謝辞

本論文の作成に、多大なご助力を頂いた北海道電力株式会社の萩原淳平氏に対し謝意を表します。

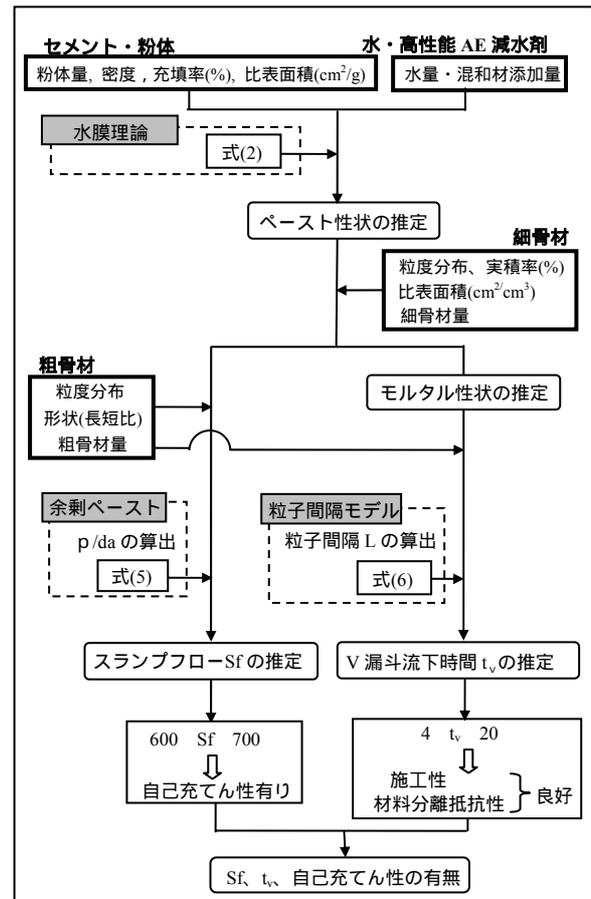


図 - 11 流動性の推定

## 参考文献

- 1) 太田顕, 名和豊春, 大沼博志: セメント粒子の凝集構造とセメントペーストの流動性の関係, コンクリート工学年次論文集, vol.23, No.2, 2001
- 2) 萩原淳平, 中井雅司, 名和豊春: モンテカルロ法を用いた高流動コンクリートの限界粗骨材量推定方法, 土木学会論文集, No.690/V-53, pp.65-82, 2001
- 3) 松下博通, 近田孝夫, 前田悦考: コンクリート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, No.578/V-37, pp.57-70, 1997
- 4) 徳光善治: 粉体の詰め込みについて, 粉体工学, 1965
- 5) 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, 技法堂, 1993
- 6) 高流動コンクリート施工指針, コンクリートライブラリー93, 土木学会, 1998