

論文

[1025] ワーカビリティ評価のために開発した斜め加力レオメータの提案

正会員 難波蓮太郎 (工学院大学工学部)

1. はじめに

フレッシュな建設材料のワーカビリティの試験方法は今迄に多く提案され実用化されてきた。特に、近年では回転粘度計、球引き上げ粘度計、平行板プラストメータ等の各種のレオメータを用いて、セメントペースト、モルタル、コンクリートのワーカビリティをレオロジー的に解明しようとする研究が多く報告されている。これは、新たに開発された材料を含めて現在多種多様化している建設材料に対して、従来のスランプ値のみによるコンステンシーの評価方法では到底表現できないレオロジー性状があり、レオロジー定数によってこれを正確に把握することが、当面する重要な研究課題となっているからである。そこで得られた結果は今後における貴重な資料になり得る。しかし、既存の試験方法から得られた材料のレオロジー特性のみから、その材料のもつ人間要因を考慮した適確なワーカビリティ特性を表現することは不可能と考える。即ち、既存の試験方法からは種々のレオロジーパラメータの或る1つ又は2つを得る事は可能であるが、得られた特性値を含めて現実には複雑に係わり合っているその他のワーカビリティ特性を同時に得ることは至難だからである。実際には材料を取り扱うのは人間であり、その時に人間が感ずる材料のワーカブルな見地からの追及は、本来求められるべきワーカビリティ (work+ability) の本質につながるものであり、それ故ワーカビリティ評価に人間要因の導入も必要である。

そこで左官技能者の鍍塗り作業に着目し、考案・開発を行ったAST装置 (Apparatus for Simulation of Trowelling) を用いることにより、左官技能者が感ずる定性的、心理的ワーカビリティ特性を定量的に捉えることを本研究の目的とした。

2. 試験装置

左官技能者から導かれるワーカビリティ特性は図1 (a) に示されるように鍍押さえ力 F (kgf)、鍍滑りにくさ ϕ (rad)、鍍のにぎりにかかるモーメント M (kgf・cm) の3特性であり、これは図1 (b) に示す斜め加力を与えるAST装置を用いてシュミレートできることを提案する [1]。

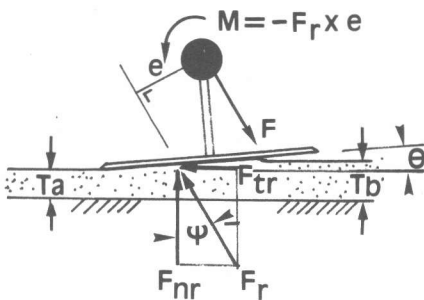


図1 (a) 鍍塗り概念図

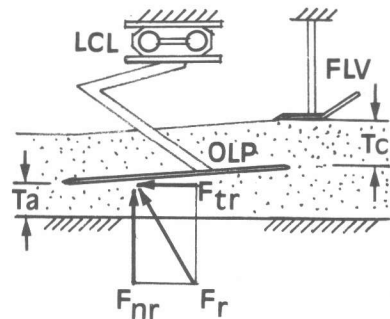


図1 (b) AST試験装置の加力部

AST装置には、ほかに鋟形レオメータや 左官ロボット等内に蔵するこれらの3特性の測定装置も含まれるが、ここでは回転形斜め加力レオメータを紹介する。図2はその断面および平面を示す。写真1はその全景である。試料を充填する2重円筒容器内に、斜め加力板 (OLP)、フロントレベラー (FLV)、アジテータ (AGT)があり、この3者は上部の回転軸に所定の位置で固定されており、軸の回転によって斜め加力板とアジテータは試料中を回転移動する。フロントレベラーは試料表面のレベルを一定に保ちながら回転移動する。加力板のV字形支柱の上端には3成分ロードセル(LCL)を固定し、これより動歪計を経てサーボコーダーに記録されるロードセルの歪から試料によって生ずる加力板への鉛直反力 F_{nr} (kgf)、水平反力 F_{tr} (kgf)、支持上端部に生ずるモーメント M_r (kgf・cm)の3特性を同時に測定することが出来る。 F (kgf): $-F_r = \sqrt{F_{tr}^2 + F_{nr}^2}$ は鋟押し力に相当し、 ϕ (rad): $\tan \phi = F_{tr}/F_{nr}$ は鋟滑りにくさ、 M (kgf・cm): $-M_r = -F_r \cdot e$ は鋟のにぎりにおける手首の支えるべきモーメントに相当する。この3特性によって鋟塗り作業時における左官技能者のワーカビリティの官能評価を定量的に置換することが可能である。

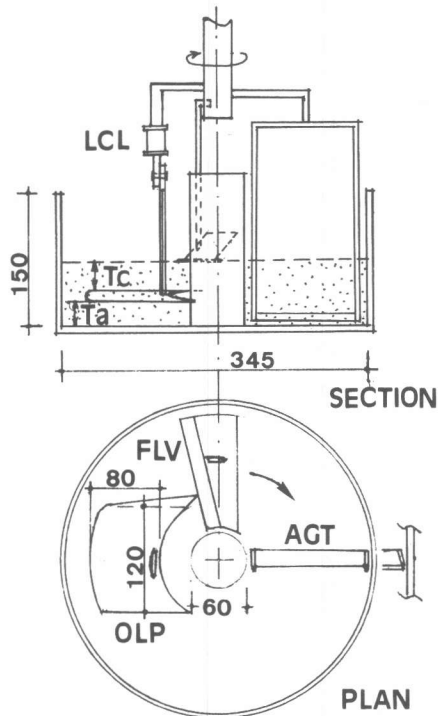


図2 斜め加力レオメータの断面・平面図

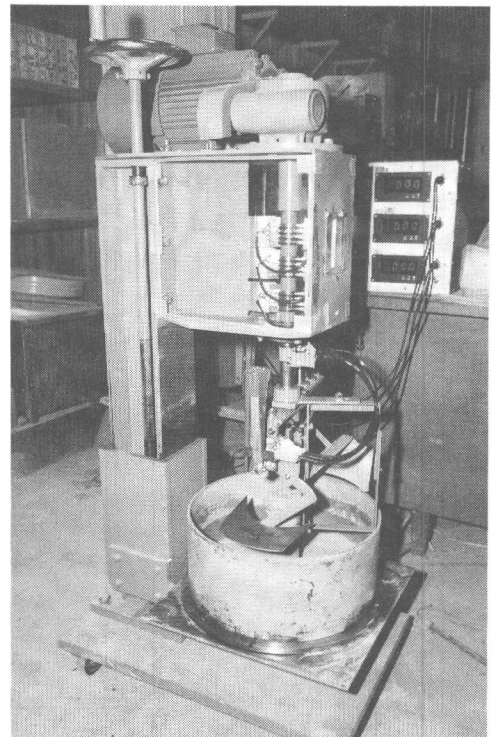


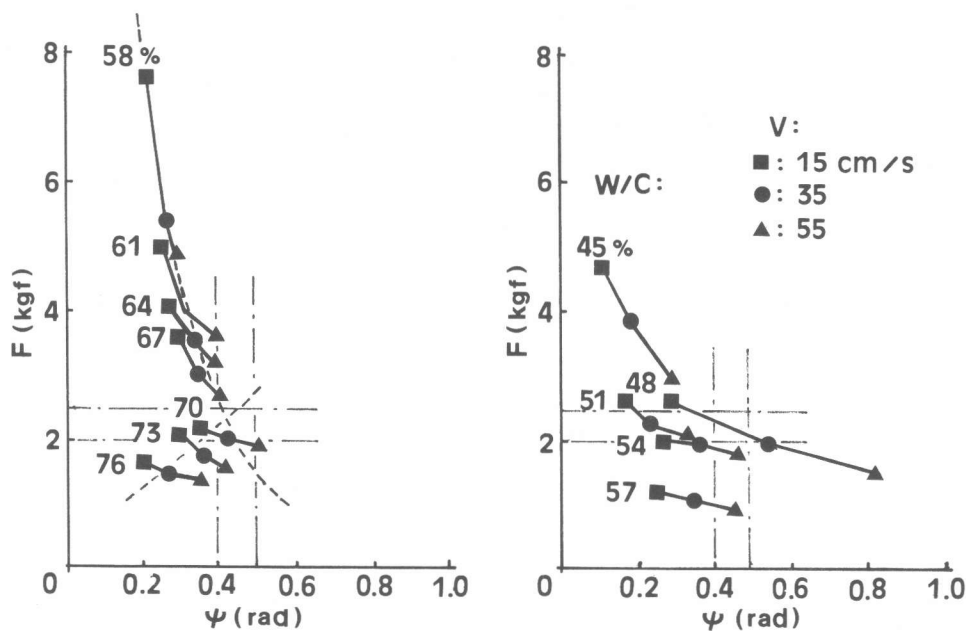
写真1 斜め加力レオメータの全景

3. 左官技能者の好むワーカビリティ

図3に試験結果の一例を示す。供試モルタルは C:S=1:2 (容積比)、#4、#6、#7のけい砂を50:40:10 (重量比) に混ぜて得られた混合けい砂使用のポリマー無混入モルタル及び同じ混

合比の混合けい砂 45%、高炉水砕スラグ 50%、ガラスマイクロバルーン 5% (重量比) を混ぜた厚塗り用混合骨材使用のSBRラテックス 7% (固形分) 混入モルタルの2種類である。セメントは普通ポルトランドセメントである。水セメント比は左官技能者の好む加水量としたものが前者で70%、後者で51%であった。これより硬めと軟らかめの試料を作製して次の試験条件で試験を行った。 $\theta:10^\circ$ 、 $T_a:21\text{mm}$ 、 $V:15, 35, 55\text{cm/sec}$ 。試験環境は $20\pm2^\circ\text{C}$ 、 $70\pm5\%\text{RH}$ であった。

加力板速度が速くなる程 F 値は低下し ϕ 値は増加する。また F 値が 2.5kgf 近辺に達する迄は水セメント比が増加する程、 F 値は低減し、 ϕ 値は増加する。しかし F 値がこの値を越えて小さくなると F 値、 ϕ 値共に低減する。この F 値の近辺即ち $2.0\sim2.5\text{kgf}$ の領域はモルタルのワーカビリティーが不安定であるが左官技能者はこの程度の F 値即ち鋳押しえ力を好む。そしてこの領域では ϕ 値は最大で、左官技能者はモルタル下地への初期及び硬化後の接着性を期待するようである。 ϕ 値については $0.4\sim0.5\text{rad}$ 近辺を好み、ポリマー無混入モルタルよりポリマーセメントモルタルのほうが適度の鋳滑りを示していて好ましいと評価した。左官技能者は、好ましいワーカビリティーを F 値で求めて加水量を決定するが、鋳滑りの適否は材料自身に負っており、加水量の多少による塩梅で自らが管理することのできないことがわかった。尚、鋳のにぎりにかかる モーメント M ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$) は F 値とほぼ直線比例することが多くの実験から得られている。即ち F 値が好ましい値であれば M 値も適正である。因に手首の疲れを表す M 値に関する現場での左官用語はない。



(a) けい砂使用ポリマー無混入モルタル

(b) 厚塗り用混合骨材使用SBRモルタル

図3 加力板速度と水セメント比の相違に従うワーカビリティーの変化(塗り厚 $T_c:21\text{mm}$)

4. 一面せん断試験と斜め加力レオメータによる斜め加力試験との関係

斜め加力レオメータから得られるワーカビリティー特性が、今日のレオロジー理論における幾つかのレオロジー定数とどの様に関係するかを追及することは非常に重要である。T.P.TASSIOS は

既往の研究に基づいてモルタルやコンクリートのワーカビリティ特性を COULOMBの原理に基づく一面せん断箱を用いて評価した [2]。この方法では試料への鉛直加重 P によって生じる垂直応力 σ' と試料へのせん断荷重 F_t によって生じる最大せん断応力 τ との間の関係を求めることによって、内部摩擦角 ϕ と粘着力 C' を求めることができる。即ち、

$$\tau = C' + \sigma' \cdot \tan \phi, \quad \text{ここで } C': \text{粘着力}, \phi: \text{内部摩擦角}$$

ところで図4に示すように斜め加力レオメータによる試料への斜め加力と一面せん断箱による鉛直、水平同時加力の間には両者間のメカニズムが極めて類似する現象を認めることができる。

ここで、斜め加力レオメータの試験においては加力板角度 θ を限り無く 0 に近づけた場合が一面せん断箱試験において P が 0 に限り無く近づき、斜め加力レオメータにおいて θ を増大させることが一面せん断箱試験において P を増大させることに相応すると考えた。すなわち斜め加力レオメータの $\theta=0$ の時 $F_{nr}=0$ であり、一面せん断箱試験において $P=0$ 、即ち $\sigma'=0$ である。斜め加力レオメータにおける F_{nr} と F_{tr} は一面せん断箱における σ' と τ との関係に対応するという仮定を立てた。そこで斜め加力レオメータで得られた結果から次の等式を導くことができる [3]。

$$F_{tr} = A \cdot C'_{ast} + F_{nr} \cdot \tan \phi_{ast}$$

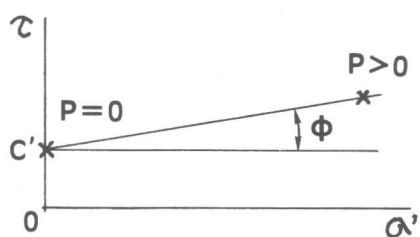
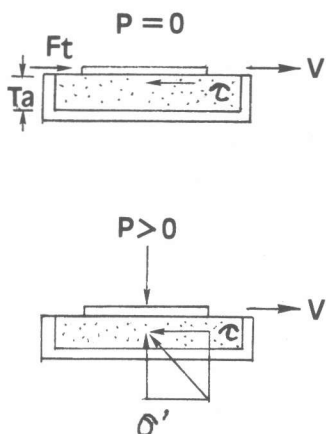
ここで C'_{ast} : 粘着力、 ϕ_{ast} : 内部摩擦角、 A : 斜め加力板の試料との接触面積 (100cm^2)。

斜め加力板は試料円筒容器の底面と角度 θ を持って試料に斜め加力を与えながら底面に平行に移動するがこの角度は余り大きいと試料が乱流となり安定しない。 $\theta: 9 \sim 10^\circ$ が限界である。又、斜め加力板は図1 (b) のようにその上、下面面が試料と接触しているが、水平反力 F_{tr} は下面に生ずる反力のみを対象とするので、測定された上下面の全水平反力の $1/2$ を採用した。試料の一部は加力板と共に粘着移動又は異常なスリップをすることが考えられるがフロントレベラーと加力板先端との最短距離 T_c を 20mm に設定することで又、加力板の材質をステンレスとしたことで加力板面と接触する試料が加力板と共に移動せず、安定したすべりを生じることができる。そのためにも角度 θ は $3 \sim 10^\circ$ 内にあることが望ましい。斯くして種々の悪影響を減じた、安定した層流を得ることができた。そして加力板の面積 A をそのまま試料との接触面積と定義付けた。

図5に斜め加力レオメータでの実験によって得られた4種類のセメントモルタルの F_{nr} - F_{tr} 座標を示す。ここでは鬼怒川産川砂 (1.2mm 以下) 入りのポリマー無混入モルタル ($W/C: 49.1\%$)、けい砂 #4、#6 が $50:50$ (重量比) の混合けい砂使用の SBRラテックス 7% (固形分) 混入モルタル ($W/C: 31.6\%$)、#4、#6 のけい砂を $50:50$ (重量比) に混合したけい砂 45% 、高炉水砕スラグ (2.5mm 以下) 50% 、ガラスマイクロバルーン 2% 及びフライアッシュ 3% を混合した厚塗り用混合骨材使用のメチルセルローズ (MC) 0.1% 混入モルタル ($W/C: 42.8\%$) を用いた。 $C:S=1:1.7$ (容積比) であった。ほかに $\bigcirc$ 社製薄塗り用市販プレミックスモルタル (粉体 $20\text{kg} + \text{EVA } 1\text{L} + \text{水 } 1.59\text{L}$) を用いた。

試験条件は $\theta: 3^\circ, 9^\circ$ 、 $T_a: 21\text{mm}$ 、 $V: 25, 55\text{cm/sec}$ である。試験環境は $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $70 \pm 5\% \text{RH}$ であった。図中の曲線は同一厚さ T_a において右端は $\theta: 9^\circ$ 、左端は 3° のときの結果の座標を結んだものである。また、この結果からそれぞれのモルタルの C'_{ast} と ϕ_{ast} を求めると表1のようになる。市販薄塗りモルタルが粘着力 C'_{ast} は大きく、厚塗り時 ($T_a: 21\text{mm}$ が厚塗りに相当する) に粘性が高く、即ち ϕ 値が大きくて塗りにくい、硬化後の下地への接着性が高い結果となる。厚塗り用混合骨材を用いた MC 入りモルタルが厚塗り時に ϕ 値が小さく塗り易いことがわかるが、 C'_{ast} が小さいために、硬化後の下地への接着性が一般に低い。ポリマー無混入の川砂使用のモルタルも C'_{ast} は小さい。これはポリマーの粘度が効果的に利用されていないからである。けい砂を用いた通常の SBR モルタルは上記厚塗りと薄塗りモルタルの中間に位置し、いわゆる標準塗り厚用普通

(a) 一面せん断箱試験



(b) 斜め加力試験

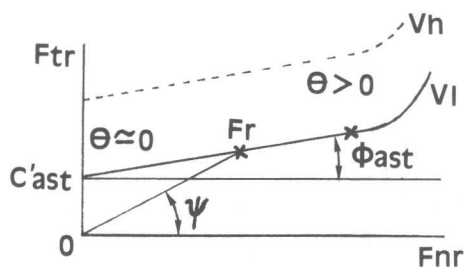
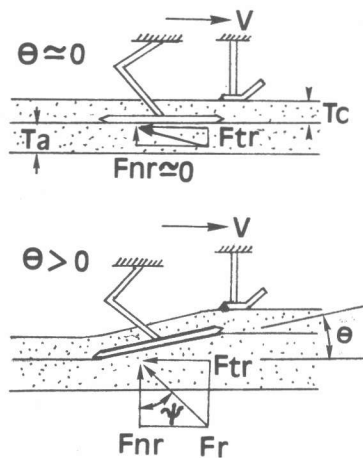


図4 一面せん断箱試験と斜め加力試験の類似性

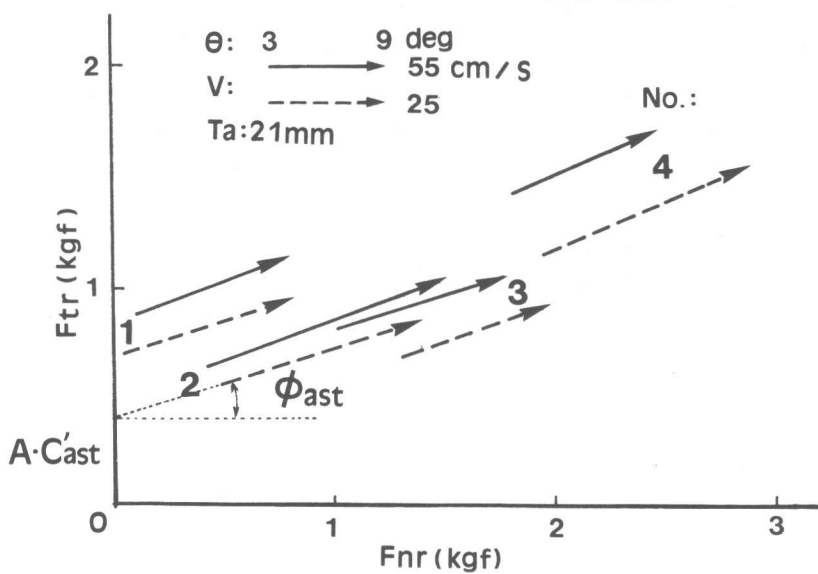


図5 各種モルタルのレオロジー特性

モルタルの特徴を示している。内部摩擦角 ϕ_{ast} についてはけい砂入りモルタルが混合骨材入りモルタルや川砂入りモルタルより大きく、けい砂の角ばった形状に影響されて塗りにくいということがわかる。市販薄塗り用モルタルは角ばった骨材を用いておらず骨材の粒度も小さく ϕ_{ast} が小さい。速度 V が小さくなると、全般に C'_{ast} は小さくなる。この現象は一面せん断箱の試験においても認められる。しかしその荷重速度と較べた場合、斜め加力試験では速度が極端に速く、実際の鍍塗り速度に相当する。粘性の高い材料は、鍍速度が速いと仕上げ塗りのとき、モルタル表面が粘ばついて鍍滑りが悪く、モルタルを引っ張って平滑な仕上げを得にくいので鍍速度を遅くして材料の C'_{ast} 又は ϕ を小さい状態に調整することが理解できる。しかし、厚塗り時に混合骨材を用いた厚塗りモルタルの場合、 C'_{ast} と ϕ の違いによる差は他の試料に較べて小さく、鍍速度の影響を余り受けないので塗り易いと考えられる。薄塗り時(一連の実験では $Ta: 3.5mm$ とした)にはこのような大きな速度差の傾向は全試料の間には見られなかった。一般にモルタルは薄塗りに用いるときワーカビリティに極端な相違はないことがわかる。

表1 各種モルタルの粘着力(C'_{ast})と内部摩擦角(ϕ_{ast})

モルタル	$V(cm/sec)$	$C'_{ast}(\times 10^{-3} kgf/cm^2)$	$\phi_{ast}(deg)$
川砂使用ポリマー無混入モルタル	25	2.04	19.5
(標準塗厚)	55	4.74	17.0
けい砂使用SBR混入モルタル	25	3.00	22.5
(標準塗厚)	55	6.14	23.0
厚塗用混合骨材使用MC混入モルタル	25	3.94	17.0
	55	4.67	19.5
薄塗り用市販プレミックスモルタル	25	6.70	17.2
	55	8.20	20.0

5. 結論

既往のワーカビリティ試験方法では材料のワーカビリティの一義的表現が一般的である。即ちスランプ試験、ペネトロメータ等において材料の自重による変形や鉛直加重による貫入深さを求めることはAST装置において容器底板面に対する垂直方向の抵抗力 F_{nr} を求めることに相応する。又、フロー試験、帯形粘度計等で水平方向の試料の広がりやせん断抵抗を求めることはAST装置において容器底板面に水平方向の抵抗力 F_{tr} を求めることに相応する。さらにAST装置で得られる M 値について、これと類似する特性値を求め得る試験方法は存在しない。コンクリートについてもこの装置は実用できた。本試験装置の応用は建設工事における“人間-工具-材料 (man-machine-material)”の3者間の関連を更に追及するためにも有効な手法であると思われる。

参考文献

- [1] 難波蓮太郎、鈴木慶一：左官工事における作業性能に関する研究 その11、日本建築学会大会学術講演梗概集、1987、pp.1300~1301
- [2] Tassios, T.P.: Plasticity and Cohesiveness of Fresh Concrete - Fresh concrete : important properties and their measurement, Proc. of RILEM, Univ. of Leeds, 1973
- [3] Naniwa, R.: Nouveau concept pour l'évaluation des caractéristiques rhéologiques d'un mortier frais, Thèse de Doctorat, Université de Liège, 1988