陶磁器素地の可塑性と基礎パラメーターとの関係*

渡 辺 信 彦

(東陶機器(株))

Relationship between the Plasticity and the Fundamental Parameters of Whiteware Bodies

By

Nobuhiko WATANABE

(TOTO Ltd., Kitakyushu-shi)

Investigating the relationship between the plasticity and the fundamental parameters, F_3 , S_a and d_s , the following results were obtained.

1) Relationship between modulus of rupture st and maximum deformation D of wet bodies was expressed by the equation:

$$D = Jf(st)$$

J was plasticity index, and $f(st)$, determined by measurement for a typical body, was the term changed with wet strength. When maximum deformation and strength of bodies were known, plasticity index could be calculated from the equation.

2) From the above equation and the already reported equation for wet strength, [maximum deformation-moisture content] curve could be calculated. When the fundamental parameters, the wet strength coefficient, and plasticity index of the body were known, strength and maximum deformation at the moisture content of shaping operations could be estimated.

3) The plasticity index was not only functions of the fundamental parameters, but also affected by higher order factors, such as shape of particles and homogeneity of cast pieces.

[Received October 15, 1971]

1. 緒 言

可塑性は陶磁器の成形において非常に重要な性質であるが、多くの要素を含めて考えることが多いため、測定方法が多数存在している。この研究では、簡単な可塑性の測定方法を示し、また可塑性と基礎パラメーター——粒子充填率 F_3 、比表面積 S_a 、粒子水合度 d_s ——との関連を検討した。

可塑性は「降伏値以上の力が加わった場合、破壊せずに連続的に変形し、しかもその変形が永久に残るような性質である」と定義されている¹⁾。このような性質は湿った粘土素地だけに見られるものではなく、金属やプラスチックにも認められる。しかし粘土素地の場合には、一般に成形しやすいかどうか、いい変えれば「腰が強いかどうか」あるいは「伸びが良いかどうか」を含めて考える場合が多く、可塑性という言葉よりも、成形性、作業性といった言葉を用いた方が適しているように思われる。これらの性質は、古くから熟練した人の感触によっ

て判断されてきたが、工業化が進むにつれて、それに代る種々の方法が考えられるようになってきた^{2), 3)}。このため多数の測定方法が発表されているが、絶対的な測定方法は、まだ存在しないように思われる。広く用いられている方法としては、たとえばつぎのようなものがある。

(a) 水分で可塑性を表示する方法——たとえば Atterberg-Rieke 法のように、流動の上限と下限との水分差で可塑性を表わしたもの、あるいは Pfferkorn 法のように、一定の変形を示すときの素地水分で表現したものなどがある⁴⁾。また Enslin value のように素地の吸水率で比較したもの^{5), 6)}、あるいは収縮水から可塑性を求めるもの⁷⁾などもある。これらの方法は実用的であるにしても、可塑性の本質を直接に表わすものではない。

(b) 変形応力に関係するもの——素地中に針を一定距離だけ押し込むのに必要な力、あるいは一定力下で進入した針の深さで可塑性を比較する方法が用いられている。また素地をノズルから押し出すのに必要な圧力と、押し出し素地の引張強度から可塑性を比較する方法もある⁸⁾。これらの方法は、素地の堅さが比較できるという

* 泥漿鑄込成形の管理について III
Studies on Slip Casting Control III

実用的な意味はあるが、変形量が関係していないため、可塑性の表示方法としては十分でないと思われる。

(c) 強度と変形量との積で表わすもの——圧縮やねじりによって試料を変形させ、破壊が生じたときの強度と変形量との積から可塑性を比較する方法で、強度の代りに降伏値を用いる場合もある⁹⁾。この方法では、柔らかくて変形量が多い素地と、堅くて変形量が少ない素地とが、同一の可塑性を示す欠点がある。

(d) 変形量で表わすもの——素地を圧縮やねじりによって変形させ、最大変形量で可塑性を比較する方法が多く用いられている。A. Baudran は種々の工業用素地について、ねじりによる「荷重—変形量」曲線を測定し、その結果から最大変形量で可塑性を比較するのがよいと結論している¹⁰⁾。また A. Dietzel は、可塑性は最大変形量で表わされるべきであるとし、圧縮による簡単な可塑性の測定方法を示し、可塑性指数を一定の素地堅さでの最大変形量で表わしている。

可塑性の測定にはこのように多くの方法があるが、これは成形性を簡単な方法で判定したいという実用面からの要求によるものであろう。可塑性を考える場合には、これを2つに分けるのが適当と思われる。1つは作業時点での、ある素地の可塑性を比較したい場合であり、いま1つは素地間の可塑性を比較したい場合である。前者では作業時水分での素地の降伏値や変形量が問題であり、作業時点での素地の成形性に重点がある。後者では素地の本質的な可塑性の優劣に重点があり、可塑性指数、可塑性係数という言葉で比較がなされている。

この研究では成形性に大きな影響を与える、素地の任意水分での最大変形量を推定する方法と、素地の本質的な性質である可塑性係数を求める方法とを検討し、さらに可塑性係数がどのような要因によって変化するかを調べた。

2. 実験方法

各種の鑄込泥漿について基礎パラメーター——粒子充填率 F_s 、比表面積 S_a 、粒子水和度 d_s ——を測定し¹²⁾、この泥漿から断面 15×15 mm、長さ 150 mm の棒状試料を鑄込成形した。種々の水分で「水分—曲げ強度—最大たわみ量」を測定した。曲げ変形は3点荷重方式で支点間距離は 5 cm、変形速度は 2.5 mm/min とした。試料の「応力—変形量」曲線は図-1 のようであり、これより曲げ強度 st 、最大変形量 D を次のようにして求めた。

$$st = \frac{3pl}{2bd^2}$$

(p ; 最大荷重, l ; 支点間距離, b ; 試料幅, d ; 試料厚さ)

D =最大たわみ量

Fig. 1.
Stress-strain curve
for real bodies.

測定装置には島津オートグラフ P-100 を用いた。

3. 結果および考察

3.1 最大変形量推定式の導出

素地を一定速度で変形させた場合の「応力—変形量」曲線は図-1 のようである。いま素地がビンガム流体で近似できるとすると、その応力 p_t は次式で表わされる。

$$p_t = \theta + \eta \frac{de}{dt} \dots \dots \dots (1)$$

(θ ; 降伏値, η ; 粘性, de/dt ; 変形速度)

この素地を一定速度で変形させた場合の「応力—変形量」曲線は図-2 のようになり、実際の曲線図-1 と一致しない。実際の素地で歪硬化が生じるのは、変形が進行するにつれて粒子配列が変化し、粘性 η が増大するためと思われる。変形がある程度進行すると破壊が生じるが、その時の変形量——最大変形量 D ——は、素地が連続的に変形できる能力によって決まる。それがどのようなもので決まるかは明らかでないが、一般には素地が柔らかいほど、変形量が多い。

Fig. 2.
Stress-strain curve for
Bingham bodies.

Fig. 3. [Maximum deformation-wet strength] curves
for various bodies. Curves were obtained
by changing moisture content.

図-3 は同一の素地について水分を変化させ、[強度 st —最大変形量 D] 曲線を求めた例である。図には3種類の素地についての[st — D] 曲線が示してあるが、曲線の形状はこのように素地によって異なる。そこで強度 st と最大変形量 D との間に、次式が成立すると仮定した。

$$D = Jf(st) \dots\dots\dots (2)$$

式中の係数 J は同一強度での最大変形量を意味しているので、これを可塑性係数と名づけた。

いま特定の素地について[強度 st —最大変形量 D] 曲線を実測し、可塑性係数 $J=1$ として(2)式から $f(st)$ 曲線を求めておけば、任意の素地については、ある強度 st での最大変形量 D がわかれば $f(st)$ 曲線および(2)式から可塑性係数 J を求めることができ、さらに[st — D] 曲線を推定できる。またすでに報告した[強度—水分] 曲線推定式¹³⁾を利用すれば[最大変形量—水分] 曲線を推定することもできる。図-4 に $f(st)$ 曲線の例を示した。

Fig. 4. st versus $f(st)$.

3.2 [最大変形量—水分] 曲線推定式の適応性

任意の素地の[最大変形量—水分] 曲線は、(2)式および図-4 から次のようにして求められる。

(a) 素地の任意の水分での強度 st_{obs} 、最大変形量 D_{obs} を測定する。

(b) 可塑性係数 J を次式から求める。

$$J = D_{obs}/f(st_{obs})$$

(c) [最大変形量 D —強度 st] 曲線を次式から推定する。

$$D = Jf(st)$$

(d) すでに報告した方法¹³⁾で[強度 st —水分 M] 曲線を求める。

(e) [D — st] 曲線と [st — M] 曲線とから[最大変形量 D —水分 M] 曲線を求める。

図-5 はこの方法で[最大変形量—水分] 曲線を求めた例である。2種の素地の推定曲線は図のように大きく隔たっているが、これは素地の基礎パラメーターに、かなりの相違があり、さらに可塑性係数も異なっているためである。しかし曲線と実測点との対応はきわめて良好で、推定曲線がよく当てはまることを示している。

図-6 は水ガラス量が異なる素地の[最大変形量—水

Fig. 5 Comparison between the observed maximum deformation (D) and the calculated curves for two different bodies.

Fig. 6. Calculated [maximum deformation—moisture content] curves of wet bodies with various waterglass content.

分] 曲線を示したものである。水ガラス量が変化しても可塑性係数に大きな変化が認められなかったので、 $J=1$ としてすべての曲線を推定した。また泥漿は粘性が一定となるように水分を調節した。推定曲線と実測点との対応は、図のように良好である。水ガラス量が増加するにつれて、同一変形量を示す水分は小さくなるのが見られる。これらの結果から、推定曲線は、かなり性質が異なる素地にも当てはまると考えられる。

したがって、代表的な素地について $f(st)$ 曲線を求めておくと、(2)式を用いて、任意の素地の[最大変形量—水分] 曲線が推定できると考えてよいであろう。この場合、素地については、基礎パラメーター F_3 , S_a , d_s , 強度係数 B , 可塑性係数 J がわかっている必要がある。

3.3 可塑性係数の変動

可塑性係数 J は素地によってかなり異なるように思

Fig. 7. Effect of clay content on plasticity index J .

Fig. 8. Relationship between plasticity index J and specific surface area S_a for various clay bodies.

われるので、つぎにその変動を調べてみた。図-7 は素地中の粘土量に対する可塑性係数 J の変化を示したものである。泥漿は水分 40% で粘性が一定となるように水ガラス量を調節した。粘土量が多くなると係数 J は著しく増大するが、30% 以上になると増加が鈍化する傾向が見られる。

図-8 には 12 種類の粘土の可塑性係数 J と比表面積 S_a との関係を示した。泥漿は粘土 30% 陶石、長石粉体 70% を混合し、水分が 40% で粘性が一定となるように水ガラス量を調節したものである。図のように比表面積 S_a が大きい粘土は一般に可塑性係数 J も大きいが、例外もあり、たとえば比表面積 S_a の割に可塑性係数 J がかなり大きい粘土も存在する。

表-1 には可塑性係数に対する泥漿のねかしの効果を示した。表には調製直後の泥漿性質と、この泥漿を長時間攪拌した場合の性質とが比較してある。ねかしによる基礎パラメーター F_3 , S_a , d_s の変化は泥漿によって異なっているが、これは調製条件の相違によるものと考えられる。しかし可塑性係数はどの泥漿においてもかなり増大しているのが見られる。これは長時間の低速攪拌によって泥漿内の粒子配列の均一化が進み、鑄込体組織がより均一になったためと考えられる。

Table 1. Effect of aging on plasticity index.

	Plasticity index J		Change of fundamental parameters on aging		
	Prepared slip	Aged slip	F_3	S_a	d_s
slip A	0.86	1.30	0.679→0.680	2.78→2.60	30.7→35.0
slip B	0.81	1.26	0.688→0.687	2.47→2.70	37.5→35.5
slip C	0.98	1.09	0.655→0.658	1.86→1.84	59.0→59.6

以上の例のように、可塑性係数は素地によってかなり変動するが、この変動には基礎パラメーター F_3 , S_a , d_s のみでなく、粒子形状や組織の均一性など、より高次の要因が大きく影響しているように思われる。これは構造敏感性が大きい、素地の連続的変形能力に、可塑性係数が関係しているためと考えられる。

4. 結 論

素地の基礎パラメーターと可塑性との関係について調べ、つぎのような結論を得た。

1) 湿潤素地の最大変形量 D は次式で推定できる。

$$D = Jf(st)$$

J は可塑性係数であり、 $f(st)$ は強度に対する最大変形量の変化項で、図-4 にその 1 例を示した。可塑性係数 J は、任意強度での最大変形量がわかれば、上式から求められる。

2) 上式と、すでに報告した「強度—水分」曲線推定式とから、「最大変形量—水分」曲線が求められる。したがって素地の基礎パラメーター F_3 , S_a , d_s , 強度係数 B , 可塑性係数 J がわかっているれば、任意水分での素地の強度、変形量が推定できる。

3) 可塑性係数は素地によってかなり異なる。それは基礎パラメーターだけで決まるものではなく、粒子の形状や組織の均一性など、より高次の要因に大きく影響される。

本論文については、東京工業大学 素木洋一教授に種々の適切なご指導をたまわり、また校閲していただいた。ここに深甚なる謝意を表す。

文 献

- 1) 素木洋一, 「セラミック外論 (1)」窯業協会 (1966), p.p. 56-79.
- 2) E.C. Bloor, *Trans. Brit. Ceram. Soc.* **56**, 423-81 (1957).
- 3) F. Singer and S.S. Singer, "Industrial Ceramics" Chapman & Hall Ltd. (1963) p.p. 326-29.
- 4) Th. Haase, *Ber. Deut. Keram. Ges.* **43** [10] 593-94 (1966).
- 5) H. Lehmann and M. Koltmann, *Ber. Deut. Keram. Ges.* **39** [4] 222-26 (1962).
- 6) F. Ranz, *Silikattechnik* **21** [8] 265-69 (1970).
- 7) *Glas-Email-Keramo Tech.* **19** [8] 283-84 (1968).
- 8) E. Scharrer and U. Hofmann, *Ber. Deut. Keram. Ges.* **35** [9] 278-85 (1958).
- 9) Kingery, "Ceramic Fabrication Processes" (1958) F.H. Norton p.p. 81-89.
- 10) A. Baudran, *Ber. Deut. Keram. Ges.* **40** [12] 625-34 (1963).
- 11) A. Dietzel, *Ber. Deut. Keram. Ges.* **45** [2] 63-66 (1968).
- 12) 渡辺信彦, 窯協誌 **80** [5] 212-18 (1972).
- 13) 渡辺信彦, 窯協誌 **80** [6] 233-38 (1972).