煉瓦の気孔率について*

西原 利夫** 郡 利 矩*** 谷 哲 郎****

On the porosity of bricks

by Toshio NISHIHARA, Toshinori KōRI and Tetsurō TANI

The porosity of a brick is calculated by comparison of apparent volume and its real volume of the brick. Therefore the porosity determined by this method shows the mean value of the sample, not that of each point.

As according to the result we obtained the stress distributions in compressed powder is very complex, it is thought that the porosity in a powdered material will be very different at each point.

As the porosity has relations between the resistance of spalling, corrosion and other properties of a brick, it will be difficult to exhibit the hole ability of the brick, if there is any point of high porosity, in spite of the mean low porosity.

Accordingly, it is desirable to know the distribution of porosity rather than to discuss about the mean value of the brick. The investigations to know the porosity by measurement of principal strain in a compressed powder, and the verification of this method, and the explanation on the distribution of the porosity on several cases are written on this report.

1. 序 言

耐火煉瓦の気孔率は並型煉瓦または同程度の大きさの塊を試料とし、1箇から普通3箇以上の立方体を切りだし、それら立方体の空隙の容積を真空室中において水で満たして測定し、それと試料の占める空間容積とから気孔率を計算し、その算術平均をもつて、その煉瓦の気孔率としている。したがって得られた値は大きな試料の平均値であつて、各部分¹⁾²⁾³⁾⁴⁾部分のそれを示すものではない。筆者らの研究によると、圧縮した粉体内の応力分布はきわめて複雑であり、かつまた、その応力は粉体の歪に関係することより、圧縮した粉体内の気孔率は各部において必ずしも均一でないことが考えられる。

近来煉瓦の成形法が stiff mud を使用するリプレスより乾式成形に移りつつあるため、その不均一性はいつそう甚だしくなりつつあると考えられる。気孔率は煉瓦の耐スポーリング性、耐侵蝕、その他の諸性質に大なる関係を有し、全体として気孔率が低い場合でも、部分的に高い点がある場合は当然充分なる能力を発揮

しえないはずである。したがって1箇の煉瓦の全体の平均気孔率に関して論ずるよりは、その分布状態を知ることが望ましい。

この報告は圧縮せられた粉体内の任意の点の主歪を測定することによつてその気孔率を求める方法を研究し、その方法が大した誤差なく使用できることを検討するとともに、二三の例について気孔率の分布状態を明らかにしたものである。

2. 粉体の気孔率と主歪との関係

(1) 理論的考察 未焼成煉瓦および煉瓦素地の気孔率については、その気孔中に存在する水分を無視すると次のように考えられる。

Fig. 1 は直径 10 cm, 高さ 20 cm の鋼製円筒型中に圧力を加えることなく、高さ 18 cm までマグネシアクリンカーの微粉末を均等に入れ、その中に白い粉で球状の目印を入れておいた場合の図である。これを 200 トンアムスラー耐圧試験機を使用して上方より圧縮すると、その圧縮後の変形は Fig. 2 に示すがごとくであつて、圧縮前球状であつた目印はほぼ楕円形に変形している。これは歪率⁵⁾⁶⁾粉体の2つの主軸 ϵ_1, ϵ_2 を通る平面で切つた断面であつて、圧縮した粉体中の任意の二点の歪率⁵⁾⁶⁾をほぼ近似的に表わすものと考えられ

* 原稿受付 昭和28年11月24日
** 正員 京都大学機械工学教室
*** 正員 京都大学工学研究所
**** 正員 品川白煉瓦株式会社

Fig. 1 Index of the powdered material filled in a cylindrical mould.

Fig. 2 Deformed feature after compression from the top.

る。今 Fig. 3(a) より圧縮され Fig. 3(b) になった場合を考えると、P 点を中心とする微小部分には圧縮の前後において明らかにその境界を通しての粉体の出入はないから、圧縮前半径 ρ_0 であった球体は圧縮されて、 ρ_1, ρ_2, ρ_3 なる長短軸を有する楕円体になったと考えるてもさしつかえない。したがって圧縮前 $4\pi\rho_0^3/3$ なる容積の部分は圧縮されて $4\pi\rho_1\rho_2\rho_3/3$ の容積になったことがわかる。今この部分の見掛気孔率が零となった場合の容積と同容積の球体を考えその半径を ρ で表わし、かつ気孔率を q とすると、圧縮せられて ρ_1, ρ_2, ρ_3 の長短軸を有する楕円体となった部分の気

(a) Spherical index before compression

(b) Strain ellipsoid after compression

Fig. 3

孔率は前に報告せる通り気孔率の定義に従って

$$q = \left\{ \frac{(\rho_1 \rho_2 \rho_3 - \rho^3)}{\rho_1 \rho_2 \rho_3} \right\} \times 100$$

$$= \left\{ 1 - \frac{(\rho_1/\rho_0)}{(\rho_1/\rho_0)(\rho_2/\rho_0)(\rho_3/\rho_0)} \right\} \times 100 \quad (1)$$

ρ_0 は粉体の圧縮前の状態により一定のものであり、また ρ は粉体の見掛比重より定まってくるから、 ρ/ρ_0 は一定の条件の原料に対しては一定であると考えてさしつかえない。これを常数 E で表わし、 $\rho_1/\rho_0, \rho_2/\rho_0, \rho_3/\rho_0$ は前に報告した表示法に従って $\varepsilon_1 = \ln(\rho_1/\rho_0)$, $\varepsilon_2 = \ln(\rho_2/\rho_0)$, $\varepsilon_3 = \ln(\rho_3/\rho_0)$ とすると、上式は次のようになる。

$$q = \left(1 - \frac{E^3}{e^{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}} \right) \times 100 \quad (2)$$

したがって圧縮した粉体内の任意の点の主歪 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ を測定すればその点の気孔率を上式により求めることができる。

(2) 実験の検討 今上に述べた(2)式によつて計算した気孔率の値が従来の浸水法によつて得た値に比してどの程度の相違があるかを検討して見る。Fig. 4 は長軸 10 cm、短軸 5 cm の楕円形の断面を有する金型の図の位置に半径 $\rho_0 = 1$ cm の球状の目印を入れた場合である。これを上方より圧縮すると、 ε_1 および ε_2 は金型が楕円形であることによりその点より側壁までの距離が方向によつて連続的に異なり、したがってその点に及ぼす側壁と粉体との摩擦の影響が方向によつて違ってくるため異なった値をとる。また中心線の上にあるため、圧縮後も常に中心線上にあり、かつ主歪 ε_3 と半径方向との方向余弦 l_1 および l_2 は常に 1 となり、(2)式を検討するのに便利である。

この金型に Table 1 のごとき性質のマグネシアクリンカーの微粉末を 18 cm の高さに入れて圧縮した場合、圧縮の平均の歪に対する歪楕円体は Fig. 5 のこ

Fig. 4

とくである。この図より ρ_1, ρ_2, ρ_3 を測定し、 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ および気孔率 q を計算すると、Table 2 のごとくなる。同表において q (実験値) とあるのは Fig. 4 の球より Fig. 5 のごとくなつた歪楕円体を取り出して従来の浸水法によつて測定した値である。これら 2 つ

Table 1 Characteristics of a specimen powder.

Tyler mesh	60 mesh up	100	150	200	250	250 low
Percentage	5.4	9.4	22.0	8.0	7.7	47.5
μ	internal friction of specimen powder					0.393
λ	friction between powder and cylinder wall					0.220
Relation between stress and strain					$\sigma = 1200 \epsilon^{13/14}$

Fig. 5 Strain ellipsoids.

Fig. 6 Relation between q and $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$.

Table 2 Values of ϵ and q calculated and mesured.

mean strain $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$	ϵ_1	ϵ_2	ϵ_3	q (calculated)	q (measured)	difference of both porosity
0	0	0	0	63.3		
0.4055	-0.0392	-0.0198	+0.6931	30.8	30.5	0.3
0.5878	-0.0677	-0.0488	+0.8671	22.3	21.0	1.3
0.6931	-0.0862	-0.0677	+0.9416	19.3	18.1	1.2
0.8363	-0.0953	-0.0770	+0.9940	16.5	14.8	1.7

の方法によつて得た気孔率とその歪 $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ との関係を図に示すと Fig. 6 のようになる。その差は気孔率が大きければ少なく、気孔率が小さくなれば大となるが、最大 1.6 % 以内であるから、かりに浸水法による測定値が正しいと考えても計算による値は充分実用に耐えらるゝと考へられる。

以上は比較的大きな球を入れて考察したが、これはできるだけ小さい方が望ましく、かつ一つの試験体について、各部の歪が測定できなければならない。その実際の方法については後に述べる方法を用いる。

3. 焼成前の気孔率と焼成後のそれとの関係

一般に煉瓦素地および不焼成煉瓦を焼成せる場合、粉体中の可燃物の燃焼および結晶構造の転位などにより気孔率は焼成前とは異なつてくる。したがつて上述の方法が焼成煉瓦の場合にも適用できるかどうかを検討する必要がある。

(1) 収縮のない場合 焼成せる場合、全体的に収縮のないとき、その焼成前の気孔率との比較は Table 3 および Fig. 7 に示すごとくであり、両者の気孔率をそれぞれ q_b , q_u とすると次の関係があることがわかる。この場合実験は $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$ にて ε_3 のみを変化させた。

$$q_b/q_u = 1 + 1/((54 \cdot 5 e^{-\varepsilon} - 18 \cdot 75)) \quad (3)$$

今一般の場合について考える。Fig. 3 において q_u は、

$$q_u = \{(\rho_1 \rho_2 \rho_3 - \rho^3) / \rho_1 \rho_2 \rho_3\} \times 100$$

粉体中の可燃物および附着力などは圧縮前様様に分散していると考えられるから、その可燃物などに相当する球の半径を a で表わすと、これが単位重量中に占める容積は一定であり、 q_b は次のように表わされる。

$$q_b = \left\{ \frac{\rho_1 \rho_2 \rho_3 - (\rho - a)^3}{\rho_1 \rho_2 \rho_3} \right\} \times 100$$

したがつて

$$\begin{aligned} \frac{q_b}{q_u} &= \frac{\rho_1 \rho_2 \rho_3 - (\rho - a)^3}{\rho_1 \rho_2 \rho_3} \\ &= 1 + \frac{3(\rho/\rho_0)^2(a/\rho_0) - 3(\rho/\rho_0)(a/\rho_0)^2}{(\rho_1/\rho_0)(\rho_2/\rho_0)(\rho_3/\rho_0) - (\rho/\rho_0)^3} \end{aligned}$$

Table 3 Values of ε and q_b/q_u being no shrinkage, calculated and measured.

ε	q/q_u (measured)	q_b/q_u (calc.)
0	1.028	1.0280
0.5111	1.077	1.0719
0.5979	1.102	1.0895
0.6931	1.139	1.1175
0.7984	1.160	1.1735

Fig. 7 Relation between q and $\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$, q_b/q_u and ε .

ρ_0 は粉体の圧縮前の状態により定まるものであり、また単位重量中に占める可燃物の容積は一定であるから a/ρ_0 は一定となる。これを I で表わし、 $\rho_1/\rho_0 = e^{\varepsilon_1}$, $\rho_2/\rho_0 = e^{\varepsilon_2}$, $\rho_3/\rho_0 = e^{\varepsilon_3}$, $\rho/\rho_0 = E$ を代入すると、

$$\frac{q_b}{q_u} = 1 + \frac{3E^2I - 3EI^2 + I^3}{e^{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3} - E^3}$$

この式において E および I はそれぞれ定数であるから、上式は次の形で表わされる。

$$\frac{q_b}{q_u} = 1 + \frac{1}{Ae^{\varepsilon} - B} \quad (4)$$

ただし A, B は、

$$A = \frac{1}{3E^2I - 3EI^2 + I^3} \quad (5)$$

$$B = \frac{E^3}{3E^2I - 3EI^2 + I^3} \quad (6)$$

使用した粉体の $E^3 = 0.331$, $I = 0.013$ であるから、これを (5), (6) に代入して A, B を求めると、 $A = 54.60$, $B = 18.04$ となり、(3) 式とほぼ同一の式を得られる。このことより (3) 式は理論的にも正しいと考えられ、この式を求めておくことにより、同一の粉体を使用する場合は焼成前の気孔率より焼成後の気孔率の分布を求めることができる。

(2) 収縮のある場合 収縮のある場合の焼成前の気孔率との比較は Table 4 および Fig. 8 に示すごとくであり、両者の気孔率は次のごとく関係にある。

Table 4 Values of ϵ and q_b/q_u of burned brick being calculated and measured.

ϵ	$q_b/q_u(\text{measured})$	$q_b/q_u(\text{calc.})$
0	0.616	0.6065
0.5111	0.638	0.6523
0.5979	0.665	0.6736
0.6931	0.706	0.7109
0.7984	0.742	0.7437

Fig. 8 Relation between q and $\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_3 + \epsilon_2$, q_b/q_u and ϵ .

$$(q_b/q_u - 0.55)(\epsilon - 1.01) = -0.051 \quad (7)$$

この場合も同様に焼成前の気孔率より、焼成後の気孔率を求めることができる。この理論的取扱いは後日にゆする。

4. 測定結果

Fig. 9 は Fig. 2 の円筒形金型に粉体を入れて、片側より圧縮した場合の歪線図を使用して、前に発表した論文⁽¹⁾中で詳細に述べた方法により各点の主歪を測定し、(2)式により気孔率の分布を調べた結果である。これは未焼成の場合であるが、その気孔率は中心にお

Fig. 9 Porosity distribution of a compressed powder in a cylinder.

Fig. 10 Deformation feature of a nozzle.

いては 28.6% より 2% まで、周辺においては 0.2% より 49.8% まで大きく変化している。Fig. 10 はノズルの金型に同一の試料を入れ、上下より圧縮した場合の歪線図であり、この歪線図より各点の主歪を測定して、(2)式により気孔率の分布を調べた結果が Fig. 11 である。この場合も気孔率は各部においてはなほ大きく異なることがわかる。

Fig. 11 Porosity distribution of a compressed powder in a nozzle shape mould.

5. 測定結果の検討

上に得た気孔率の分布が正しいかどうかを検討して見る。今円筒形金型中において圧縮した粉体内の任意の点の気孔率を不焼成の場合 $q_u(r, \theta, z)$ で表わすと、Fig. 12 において

$$q_u(r, \theta, z) = \frac{dV_u}{dV}$$

ただし dV_u は微小部分の中に存在する気孔の容積、 dV は微小部分全体の容積とする。したがって

$$dV_u = q_u(r, \theta, z) dV$$

一方 Fig. 12 より

$$dV = r dr d\theta dz$$

Fig. 12

$$\text{ゆえに } dV_u = q_u(r, \theta, z) r dr d\theta dz$$

これを試料全体について積分すると試料全体中に存在する気孔の容積は

$$\begin{aligned} V_u &= \int_0^{l_1} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_1} q_u(r, \theta, z) r dr d\theta dz \\ &= 2\pi \int_0^{l_1} \int_0^{r_1} q_u(r, z) r dr dz \end{aligned}$$

一方この試料全体の容積 V は

$$V = \pi r_1^2 l_1$$

したがって試料全体の平均気孔率 q_m は

$$q_m = \frac{V_u}{V} \times 100 = \frac{2\pi \int_0^{l_1} \int_0^{r_1} q_u(r, z) r dr dz}{\pi r_1^2 l_1} \times 100 \quad (8)$$

これは気孔率の分布を知れば近似値を求めることができる。

Fig. 11 の気孔率の分布より計算した q_m は、22.1% であり、一方浸水法によって測定した値は21.5%であった。したがって、その誤差は僅少であり、計算した気孔率の分布は正しいものと考えて差しつかえない。

9. 結 言

(1) 圧縮せられた粉体内の気孔率と主歪との間の関係について考察を行い、その関係式を理論的に導びいた。

(2) そして焼成前の気孔率と焼成後の気孔率との間に一定の関係があることを実験的に確かめ、収縮のない場合、収縮のある場合について q_b/q_u と ϵ との関係式を求めた。

(3) さらに上に導びいた気孔率と主歪の関係式を用いて、2つの例について圧縮せられた粉体内の気孔率の分布状態を調べ、気孔率は同一試料においてもその場所によつてはなはだしく異なることを示し、従来の浸水法による測定は単に平均値を与えるのみであつて、そのものの真の性質を代表する気孔率を与えるものではないことを示した。

(4) 上に得た気孔率の分布より、その試料全体の平均気孔率 q_m を計算によつて近似的に求め、浸水法による q_m とよく一致することを確かめた。

以上に得た結果は気孔率の分布についてであるが、気孔率は収縮膨脹、抗張力、通気率などに関係あり、したがって焼成時の応力、耐侵蝕性、乾燥などについても調べられるはずである。さらに実験を行い、これらの気孔率分布の影響を明らかにしたい。

注：一

- 1) 西原、郡、谷、昭和27年10月關西工學連合講演會において講演
- 2) 西原、郡、谷、昭和23年5月京大工研講演會において講演
- 3) 西原、郡、谷、昭和28年9月第3回應力學會連合講演會において講演
- 4) 西原、郡、谷、昭和28年10月關西工學連合講演會において講演
- 5) 郡、谷、材料試験協會誌、2巻、9號