カーボンペーストの成形時における圧力分布

望月文男*・杉山 忠*

(昭和44年1月25日受理)

Pressure Distribution in Compacting Carbon Paste

Fumio Mochizuki and Tadashi Sugiyama
Nippon Light Metal Research Laboratory, Ltd.
4540 Kambara, Kambara-cho, Ihara-gun, Shizuoka-ken

Pressure distribution in compacting carbon paste was measured by using strain-gages mounted on the outer surface of the steel molds. Compression of the carbon paste was performed by two methods, tamping and pressing, which were selected as typical impact and static compression methods, respectively.

The results are summarized as follows:

- 1) Under static compression, the pressure along an axial direction of the molded paste of low binder concentration decreases exponentially with the increase of depth. Pressure along a radial direction of the paste amounts only to about a half of that along an axial direction.
- 2) Impact compression gives more uniform pressure distribution than static compression. Pressure induced in the paste depends on the height of the packing layer.
- 3) The pressure distribution changes suddenly from the state of powder compression to that of liquid compression when the binder content exceeds a certain amount. This phenomenon gives a good estimation of the optimum binder content for carbon aggregates.

1. 緒 言

カーボン工業で広く採用されている成形法としては、押し出し成形法のほかに、骨材コークスとバインダーからなるねつ合物（以下カーボンペーストと呼ぶ）を金型に充填するいわゆる圧縮成形法がある。圧縮成形法には、ピストンで徐々に加圧する型込み成形法、ランマーでたたいて充填するタンピング成形法、おもりをのせて上下にゆすって成形する Jar Molding 法¹⁾、振動を与えて充填する振動成形法²⁾などがあるが、これらを荷重の種類で分類すると、静荷重を使用する静的圧縮法と、衝撃荷重を使用する衝撃圧縮法の二つに大別される。³⁾

ところで、液体や剛体を加圧するときの力学的挙動は比較的簡単であるが、粉体やカーボンペーストを圧縮す

るときの圧力の伝達は複雑であり、単純な一般的理論で処理することは困難である。³⁾ すなわち、これらは一点に加えられた力を各方向に均等に伝えることは不可能であるし、また金型壁との摩擦および粒子間の摩擦によって内部の圧力分布は不均一となる。これらの圧力分布を解明することは、金型の設計や成形法の選択のためばかりでなく、均質成形体を得るためにも重要である。

本報では、静的圧縮法の代表に型込み成形法を、また衝撃圧縮法の代表としてタンピング成形法を選び、カーボンペーストの成形時における圧力分布の比較を行なった。なお、ペースト内の圧力分布は、ストレンゲージをはりつけた金型⁴⁾にカーボンペーストを入れ、これを圧縮したときの金型各部の重みを測定することによって求めた。

*日本軽金属総合研究所

静岡県庵原郡蒲原町蒲原4540

2. 実験方法

2.1 成形用金型

実験に使用した金型を Fig. 1 に示す。金型は内径 40 mm と 60 mm の 2 種類を製作した。シリンダーの肉厚は、いずれも 5 mm とした。

Fig. 1 Steel mold

シリンダーの外周には、Fig. 1 に示すように $q_{(1)}$ から $q_{(4)}$ まで 4 段にわたってストレンゲージをはりつけ、シリンダーの円周方向の歪みからシリンダーの内壁に働く圧力（側圧）を測定できるようにした。各段は、同一円周上にはりつけた 4 枚のストレンゲージ（ゲージ寸法 20×2.5 mm）を、直・並列のブリッジ 1 回路に組むことによって構成した。

下部ピストンの検力部は感度を良くするために、内部を中空にして肉厚を 5 mm とした。ここにストレンゲージ 4 枚をはりつけ、同様にブリッジ 1 回路に組んで、ピストンの長軸方向の歪みから下部ピストンの受ける圧力（底圧）を測定した。

金型に発生する歪み量を圧力に換算するためには、装置の較正が必要である。このため、アルコールを充填した軟質ゴム球を金型に入れ、アムスラー材料試験機を使用してピストンで加圧したときの圧力と金型の歪み量の関係から検力線を作成した。液体の代りに軟質ゴムを充填しても、液体圧縮とほぼ同じ結果が得られた。歪みは、動歪み計（新興通信 DS 6/RX）で測定した。圧力と金型の歪みとの間には良い直線性が成立した。

2.2 静的圧縮試験法

金型に粉体またはカーボンペーストを入れ、片押し法で通常は総荷重 2 ton まで加圧した。使用した原料の特性を Table 1 に示す。バインダーとしては、20℃で粘度約 100 poise のコールタールを使用した。粘度 100 poise は、ピッチの環球法軟化点よりも約 4.5℃高い温度、すなわち通常の成形温度に近いバインダーの粘度に相当する。ストレンゲージの温度補償を容易にするために、すべての実験を室温で行なった。

側圧の分布をシリンダーの歪みが正確に表現できるのが理想であるが、実際にはシリンダーに肉厚が、またストレンゲージに幅があるために、ある深さにおける平均的圧力が表示される。HM 骨材にタールを内割りで 1.7% 添加したペーストについて、シリンダー各部の歪み $q_{(1)} \sim q_{(4)}$ とペースト深さ h との関係を細かく調べた結果を、Fig. 2 に示した。これは、ペーストの 1 層の厚さを 5 mm

Fig. 2 Strain distribution induced in cylinder (HM ~ 1.7% tar)

にして何層も充填と圧縮を繰り返した場合である。 h には、ペースト上面からゲージの中心位置までの距離を採用した。Fig. 2 に示されるように、 h が 1 cm 以下の歪みは異常に小さく、 h としては 1 cm 以上をとる必要がある。ペースト上面付近の歪みが小さくなった一因として、上部ピストンとシリンダーの間隙が大き過ぎて（間隙 = 2.5 mm）、この部分の側圧が減少したことも挙げられる。

加圧方向の圧力の大きさとペースト深さとの関係を調べるために、通常はペーストを 3~4 層に分けて充填し、各充填ごとに底圧 p を測定した。この場合は、当然のことながら、充填層の高さ H が深さ h に等しくなる。

2.3 衝撃圧縮試験法

使用したエヤーランマーの仕様を Table 2 に示す。通常は、空気圧を 6 kg/cm^2 、1 層当りの詰め時間を 10

Table 1. Aggregate and Binder

Aggregate size distribution (%)				Properties of coal tar	
Coke No.	HM	E.P.	P.C.		
12~2 mm		40		Softening point R.B. (°C)	-5
2~0.074	75	35	50	Coking value (%)	31.0
-0.074	25	25	50	Benzene-insoluble (%)	10.6

Table 2. Air Rammer

No.	Air		Piston (mmφ)	Stroke (mm)	Cycle (C/S)	Weight (kg)
	(kg/cm ²)	(m ³ /min)				
S-1	6	0.45	25	100	13~15	6.5
FR-C	6	0.40	22	55	16~18	2.9

が成立するので、
相対値、100
(p/P_0)または
100(q/P_0)で圧
力を表示してもさ
しつかえない。通
常は1層の高さを

3 cm にして4層詰めを行なった
が、6 cm 高さで2層詰めの場合
でもほぼ同じ圧力分布が得られた。

p と q を対数にとれば、深さ
 h/D との間に良い直線性が得られ
るので、ペースト内の圧力は次式

秒間とした。

前出のカーボンペースト(HM骨材, タール17%)
をランマー詰めするとき、ランマーの1打ごとに金型
に発生する歪み波形をFig.3に示す。この波形は、記録
紙の送り速度を1m/secにして、電磁オシログラフで記
録させたものである。底圧 p および側圧 q の大きさは、
これら歪み波の波高値から換算した。

金型の下には、厚さ5mmのゴム板を挿入してランマ
ー詰めの際の衝撃による金型のはね上りを防止した。コンク
リート床の上に金型を直接置くのに比べて、ゴム板を挿入
するとペースト内部に発生する圧力は約1割減少する。

Fig.3 Typical wave form of strain
in mold

3. 実験結果および考察

3.1 静的圧縮における圧力分布

カーボンペースト(HM骨材, タール17%)を金型
に入れ、ピストンで静かに圧縮したときの圧力分布を
Fig.4に示す。実際は両金型とも総荷重を2tonにし
て測定したが、比較に便利のようにペースト上面に掛け
る圧力 P_0 を100kg/cm²としたときの底圧 p および側圧
 q で表示した。 P_0 と p ,または q の間には良い比例関係

で表わされる。

$$\log p = \log p_0 - A (h/D) \quad (1)$$

$$\log q = \log q_0 - B (h/D) \quad (2)$$

Fig.4 Pressure distribution under
static compression
(HM~17% tar, $P_0=100\text{kg/cm}^2$)

たゞし、 p_0, q_0 は $h/D=0$ における外挿値、 A, B
は両直線の勾配である。Fig.4に示されるように、 A と
 B はほぼ等しく、金型の直径による差も比較的小さい。
また、ペースト上面に加えた圧力は深さの増大と共に指
数関数的に減少し、深さが直径の2倍になると圧力は約
半分になる。残りの力はペーストと金型壁との摩擦によ
ってシリンダーに伝わり、いたずらに受け台を下方に押
すのに費される。側圧 q は加圧方向の圧力 p の約1/2し
か発現していない。

いま、金型に粉体を入れて圧縮する際の厚さ dh なる

薄層の力の釣り合いを考える。Fig. 5において、粉体と

Fig. 5 Pressure transmission in compacting powder

金型壁との摩擦係数を μ , dh での圧力の減少分を dp とする。粉体層に働く重力を無視すると、応力平衡式として (3) 式が成立する。

$$\frac{\pi D^2}{4} dp = \mu q \pi D dh \quad (3)$$

側圧 q は p に比例するとし、係数を K とする。

$$q = K p \quad (4)$$

(4) 式を (3) 式に代入して積分すると

$$p = p_0 e^{-4 \mu K (h/D)} \quad (5)$$

または

$$\log p = \log p_0 - 1.74 \mu K (h/D) \quad (6)$$

が得られる。(5) (6) 式は、Janssen の式としてよく知られている。³⁾ 実際には、同一深さにおいても、中心からの距離によって p が異なる場合があるので、いつもこれらの式が成立するとは限らない。

粉体の内部摩擦角を ϕ とすると、Rankine によれば、 K は (7) 式で与えられる。⁶⁾

$$K = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \quad (7)$$

(7) 式は、粒子間の付着力が無視できるとき、および μ が小さいときにのみ成立する。⁵⁾

以上は粉体圧縮の基本式であるが、Fig. 4 の結果は、カーボンペーストに対してもこれらの式が良く適合できることを示している。いま深さ $h = D$ のときの、 p と q の比率から K を求め、直線の勾配 $A = 1.74 \mu K$ において圧力分布の諸定数を求めれば、Table 3 を得る。

金型によって定数に多少の差があるが、Table 3 の平均値を採用すれば、このカーボンペーストの圧力分布式として (8) 式を得る。

$$p = 0.95 P_0 e^{-0.33 (h/D)} \quad (8)$$

ただし、 P_0 はペースト上面に加えた圧力を示す。側圧は、 $q = 0.56 p$ から求められる。

3.2 衝撃圧縮における圧力分布

ランマーの有効質量を m とし、 v_0 なる速度でランマーがペースト上面に衝突し、 Δt 秒後に速度が v になったとする。このとき発生する力 F' は、Newton の第 2 法則から (9) 式で与えられる。

$$F' = m \frac{v_0 - v}{\Delta t} \quad (9)$$

圧力の発生は Fig. 3 に示されたように、衝突の瞬間から急速に増大して最大値に達し、それから減少してゼロになる。(9) 式から、ランマーの 1 打ごとの衝撃エネルギーが一定であっても、発生する衝撃力はランマーの減速時間によって異なることがわかる。ランマーの減速時間には、ペーストのクッション性、すなわち充填層の高さと詰まりぐあいが関係する。

金型に 1 層の厚さが 3 cm になるようにカーボンペースト (HM 骨材、タール 17%) を入れ、S-1 ランマーで充填したときの詰め時間と圧力との関係を Fig. 6 に示す。圧力は、最下段の側圧 $q_{(1)}$ と底圧 p で表示した。

Fig. 6 Effect of tamping time on pressure (40 ϕ , S-1 Rammer)

1 層の場合は、ペーストの充填度が高まるにつれて発生する圧力が増大し、 p は約 10 打目、時間にして 0.8 秒でほぼ平衡に達する。 q はややおくれて約 3 秒で平衡に達する。2 層になって充填層が高くなると、圧力の発生は小さくなる。また p と q はほぼ同様に挙動し、約 3 秒で平衡に達する。以後の実験では、4~5 秒における平均圧力を表示した。

Table 3. Constants of Pressure Distribution under Static Compression
(HM~17% tar, $P_0=100 \text{ kg/cm}^2$)

Mold (mm ϕ)	p_0 (kg/cm^2)	q_0 (kg/cm^2)	A	B	K	μ	ϕ°
40	89.3	53.5	0.140	0.134	0.602	0.143	15
60	100	52.8	0.136	0.148	0.515	0.152	19
Mean	94.6	53.2	0.138	0.141	0.558	0.148	17

Table 4. Constants of Pressure Distribution under Impact
Compression (HM~17% tar)

Rammer	Mold (mm ϕ)	p_0 (kg/cm^2)	P_T (kg)	C	K
S-1	40	75.0	94.5	0.224	0.930
	60	30.0	84.6	0.209	0.833
	Mean	52.5	89.6	0.216	0.882
FR-C	40	26.5	334	0.178	0.941
	60	13.0	367	0.230	0.875
	Mean	19.8	350	0.204	0.908

Table 5. Effect of Binder Content on Pressure Distribution Constants
($P_0=100 \text{ kg/cm}^2$)

Binder (%)	p_0 (kg/cm^2)	q_0 (kg/cm^2)	A	B	K	μ	ϕ°
0	98.6	50.1	0.144	0.143	0.512	0.161	19
10	100	48.5	0.119	0.122	0.486	0.140	20
17	99.3	50.7	0.129	0.144	0.476	0.155	21
19	90.1	51.0	0.150	0.146	0.571	0.152	16
20	88.0	53.5	0.165	0.155	0.621	0.153	13
21	88.7	61.3	0.161	0.155	0.700	0.132	10
22	97.2	81.0	0.115	0.107	0.849	0.078	5
23	98.6	90.1	0.050	0.060	0.896	0.032	3
24	97.2	93.0	0.016	0.028	0.940	0.010	2
25	98.6	94.4	0.002	0.014	0.977	0.001	1

Fig.7 Pressure distribution under impact compression
(HM~17% tar, S-1 Rammer)

S-1 ランマーで上述のカーボンペーストを圧縮するときの圧力分布を Fig.7 に示す。図中、白点は側圧を、黒点は底圧を示す。

衝撃圧縮における側圧の分布は、静的圧縮の場合と全く異なる。すなわち、側圧は層数（充填層の高さ H ）には依存するが、深さ h による変化はきわめて少なくなり、圧力分布は著しく均一になる。この装置では底圧 p は測れても、ペースト内部の加圧方向の圧力を直接測定することはできない。しかし、側圧の分布から考えて、加圧方向の圧力も側圧と同様に深さ

に対してほぼ一様に分布しているものと考えられる。したがって、底圧 p の変化は深さ (h/D) の影響ではなく、高さ (H/D) による影響である。

$\log p$ の直線の勾配を C とすると、(10) 式が成立する。

$$\log p = \log p_0 - C(H/D) \quad (10)$$

ランマーと金型を変えて圧縮試験を行なった結果を、Table 4 に示した。 P_T は p_0 と金型内断面積との積であって、ランマ

ーの瞬間最大荷重を表わす。 K は詰め時間および層数によって異なるので、定数としては取り扱えない。しかし側圧の大きさの参考になるので、高さ H が D に近いときの、側圧 q_0 と底圧 p の比で K を示した。衝撃圧縮の K は、静的圧縮のときよりも 1 に近い。

静的圧縮と衝撃圧縮の圧力分布の相違を、模式的に Fig.8 に示した。静的圧縮においては、骨材と型壁との摩擦によって、ペースト深部への圧力伝達とは著しく阻害される。このため、型詰め成形における成形体の高さは約 40 cm が限度とされている。¹⁾

Fig.8 Comparison of pressure distributions

これに対し衝撃圧縮においては、瞬間的に重みエネルギーが発生して圧力を内部に伝達させ、粒子の移動とブリッジの破壊を積極的に援助する。Jar Molding では、おもりの圧力はきわめて小さいにもかかわらず、高さ2 mにも及ぶ成形体が成形可能である¹⁾という事実も、衝撃圧縮における圧力分布の均一性から説明できる。

Fig.9 Effect of binder content on pressure distribution (HM aggregate)

3.3 バインダー量の影響

HM骨材にタールを0～2.5%添加したカーボンペーストについて、静的圧縮下における圧力分布定数を求めた。測定結果をTable 5に示す。

液体圧縮の場合は、圧力はあらゆる方向に均等に分布する。したがってこのときの各定数は、 $p = p_0$, $q = q_0$, $p_0 = q_0$, $A = B = 0$, $K = 1$, $\mu = 0$, $\phi = 0$ となる。Table 5に示されるように、バインダー量が多い場合はこれらの条件に近く、液体圧縮の状態に類似することがわかる。

バインダー量による A , K および μ の変化をFig.9に示す。バインダー量が少ない間は、 A , K , μ は粉体圧縮の場合と大差ない。圧縮下では、粒子間のバインダーが破れて粒子が直接接触の状態にあり、また圧縮平衡下では、滑り摩擦よりも静止摩擦が支配的となる。したがって、バインダー量が少ない場合は、バインダーの潤滑作用はあまり圧力分布の改善には役立たないものと考えられる。ただし、バインダー量によって成形圧力と充填密度の関係曲線が異なり、バインダー量が増加すると、同一圧力、同一圧力分布でも成形体のかさ比重が増大する場合が多いので、留意しておく必要がある。

バインダー量が1.8%を越えると、側圧が増大してまず K が上昇し始める。2.0%付近になると急激に圧力分布が改善されて、 A および μ はゼロに近づく。このような粉体圧縮から液体圧縮への急変点は、粒子間隙を満たすに足るバインダー量に対応するものと考えられる。すなわち、バインダーに粘性があるために、粒子間隙に充填するバインダーを加圧によって排除することは容易ではない。したがって、これ以上のバインダー量のペーストは、すべて液体圧縮の状態となる。

カーボンペーストの最適バインダー量は同一骨材配合に対しても使用条件によって大きく異なり、その可塑性はスタンプ材のようにパサパサのものからゼーダーペーストのようにドロドロのものまで著しく変化する。型込め成形用ペーストのバインダー量は、Fig.9の粉体圧縮の領域にあり、バインダー量の選択範囲は比較的広い。押し出し成形用ペーストのバインダー量は、圧力分布の急変点のバインダー量に近い。押し出し成形の場合、現場で調節し得るバインダー量の範囲は1%以下であるといわれるのも、このような圧力分布の急変点があるためと考えられる。ゼーダーペーストは自然流動が必要となるために、粒子間隙を満たす以上のバインダー量が添加される。

バインダー量の管理試験としては、エロンゲーション法、かきまぜ動力法、押し出し法などが挙げられるが、粒子間隙を満たすに足るバインダー量を実測して最適バイ

ンダー量の算定基礎を得るためには、上述の圧力分布の急変現象が有用である。バインダー量の決定法としては、充填層の高さをほぼ一定にして側圧 $q_{(0)}$ の変化を追跡するだけで良い。Table 1 に示した骨材を使用し、タルの添加量を変えた場合の $q_{(0)}$ の変化をFig. 10 に示す。

Fig. 10 Effect of binder content on side pressure ($P_0 = 100 \text{ kg/cm}^2$)

バインダー量が少ない場合は、いずれの骨材もほぼ同じ $q_{(0)}$ を示す。このことは、圧力分布に及ぼす骨材の粒度分布の影響が比較的小さいことを示す。P.C.骨材は微粉量が多いために、急変点のバインダー量が多い。

衝撃圧縮においてもFig. 10と同様にバインダー量によって圧力の急変が認められるが、検出精度は静的圧縮に劣る。また、静的圧縮では安価な静歪み計を使用できる利点がある。

4. 総 括

静的圧縮法の代表として型詰め成形法を、また衝撃圧縮法の代表としてランマーによるタンピング成形法を選び、カーボンペーストの成形時における圧力分布を比較した。得られた結果を次に示す。

- 1) 静的圧縮においては、型詰め成形用ペースト内の圧力は深さの増大と共に指数関数的に減少する。側圧は加圧方向の圧力の約1/2しか発現しない。
- 2) 衝撃圧縮におけるペースト内の圧力分布は、静的圧縮に比べると著しく均一である。発生する圧力の大きさ自体は、充填層の高さに依存する。
- 3) カーボンペーストのバインダー量が増加するとき、バインダー量がある値を越えると、粉体圧縮の状態から急激に液体圧縮の状態に移行する。この現象は、最適バインダー量を決定するための指標となる。

文 献

- 1) Kirk-Othmer: Encyclopedia of Chem. Tech., **4**, 173 (2nd. Ed., 1964)
- 2) W. Heit, Z. Erz. Metall., **21**, no 4, 178 (1968)
- 3) 川北, 津々見, 化学と工業, **20**, 443 (1967)
- 4) S.J. Bustamante, H. Sheinberg, Powder Metallurgy, 1960, No 6, P. 36
- 5) 大矢根, 粉体および粉末冶金, **13**, no 3, 113 (1966)
- 6) 梅屋, 小松崎, 材料, **17**, No 177, 489 (1968)