コンベヤー樋中の粒体の流れ*

正 会 員 林 大 輔**

Flow of Granular Fluid on Conveyer-Trough

Daisuke HAYASHI

The author summes up his research on the effects of internal frictional-resistance on the chain-pull of the perforated conveyer-trough by means of measuring its dynamic side wall pressure and the flow patterns of the conveyed materials (beach gravels).

The results obtained are as follows:—

- 1) The weaker the scraping action of the chain and the stronger the side wall frictional coefficient, the greater becomes the structural-variation-resistance based on the mutual slips of conveyed granular fluid materials.
- 2) Accordingly, the structural-variation-resistance keeps the close relationship with the flow-patterns of the conveyed fluid materials.
- 3) The greater the structural-variation-resistance, the greater becomes the dynamic pressure on the side wall.
- 4) When the granular fluid materials with the same size are used, under the same height-width ratio, the narrower the trough-width, in the greater ratio becomes the structural-variation-resistance.

1. 緒 言

特別の掻板を持たず樋の高さに比較して背の低いチェーンを使用するチェーン・コンベヤーの類は、至極簡単な構造のものであることは周知の通りであるが、簡単な割合にこの樋の中の運搬粒体の流れとチェーンの牽引抵抗との関係についてはまだそれ程詳細でない。

著者はごく短かい樋を使った模型的な装置でも実験の方法さえ考慮すれば、長い樋の場合と同様の結果を推察するに足るデータが計測され、以上の関係が簡便に確かめられることを知つたので、二三の場合について実験的な究明を試みた。

ここではその1例としてL型の樋を使い、運搬粒体の流れ模様を調べ、その流れ抵抗と樋側壁圧を測定して、粒体間の相互滑りによる流れ抵抗が存在することと、その発現度合が同一種類で同一粒度の粒体でも、その積高さや樋とチェーンの相対寸法等の相違によつて著しく違つてくることを証明してパーホレーテッド・ベルトを使った樋コンベヤーの設計資料の一端とする。

2. 装置と方法

2.1 装置の I

* 昭和32年2月1日受理

昭和30年4月23日、日本鉱業会春季講演会にて一部発表

** 鹿児島大学工学部教授

粒体の樋中での流れ模様を上表面から観察することは容易であるが、この上表面流れと内部の動きとの関連は直接内部が見えないと詳細をつくす訳にゆかない。

この意味で第1図のように長さ20cm程の木樋の底に曳板を置き、この上にガラスや竹の細棒を積み、曳板を移動して棒端の流れ模様を計測する装置とすると、運搬物の嚙合方が相違する点と沈下運動をしない点で、この流れ模様は粒体の流れともちろん同一のものではないが、曳板の移動が僅少で粒体の沈下運動が微量の場合とはよく似た傾向を示しているので、この装置によつて板面の摩擦係数や樋布設角・壁面傾斜角その他の条件の相違による上表面流れと内部の動きの関連を詳細に考察されて便利である。

第 1 図

第2図 装置Ⅱと測定方法

2.2 装置のⅡ

装置のⅠと同じ型式ではあるが、運搬物として粒体を積めるように樋を長くして側壁にガラス板や鉄板等をあてるようにしたり、チェーンとして平板の外に角棧つきの木板を用いたり、第2図のようにねじ仕かけの曳出し装置を用意して曳出し速度を0.03m/secに保つようにしたり、スプリングバランスで牽引抵抗を計るようにした等の点で違っている。

なお、この装置に実用機の樋やチェーンを用いても一向に差支えなく、短い実用機そのままを用いた現場実験も著者は実施している（別に報告している）が、ここでは模型実験としての利用価値を示すためそれ等には触れない。

樋の長さ：樋の長さは短かい程粒体も少量ですみ、実験操作も簡単で万事手軽にすむがやはり限度がある。樋の最短長は、樋の中に粒体を積みその上面を均らし、この面に適当な間隔で石灰粉等で横断白線を描いた上でチェーンを移動すると第3図のように白線の変形が起り、この変形模様が樋の頭・尾・胴の各部でそれぞれ違うので、この相違を利用して頭尾部が判然と区別出来るように相当な長さをもつた胴部を与えるように樋の全長

(上) 樋巾広く一様に流れる。 (下) 樋巾狭く流れにくい

第3図 粒体の上表面流れ分布曲線

を決定する。こうして決定した樋の全長は側壁の角度や樋の布設角、底巾等で違って来る。

著者がL型樋で巾8~20cmのものを水平布設とした場合に使用した樋長は2mである。

2.3 流れ量と流れ抵抗の測定

粒体の流れ量＝頭部からの排出量の求め方：この求め方は、まず樋の中に粒体を頭・尾部を安息角として胴部を所定の長さとし高さに積み上げ、つぎにチェーンを一定速度で曳出しながら、曳出し単位長さ当りの排出重量を計測してゆくと、最初は第2図のように頭部が余分に崩れるためこの排出量が多いが、曳出しにつれて崩れる量が漸次減りじきに一定値に落ついて、一定の形状をした頭部となってくるので、胴・尾部は補盛りをしながらこの定量となつた排出量を計つて流れ量とすればよい。

流れ係数：粒体は特定条件の場合を除いては、チェーンと同速度で全部均一に流れる訳でないので、チェーンと同速度で全部の粒体が均一に流れると仮定した場合の排出量と実際排出量との比をとつて流れ係数とした。

流れ抵抗：以上の操作によつて頭部の積み具合を落ちつかせた上で補盛りして、所定の長さとした胴部と尾部（安息角にあわせてある）を整えた粒体堆積について、チェーン牽引力をスプリングバランスで第1に計り、つぎにこの場合に形成したと同様な堆積から胴部分だけを除去したものを別につくり、これについてのチェーン牽引力を第2に求め、さらに以上の胴部の粒体堆積重量と等価な鉄塊を求めて側壁に触れないようにしてチェーン上に乗せて第3の牽引力を計り、第1値から第2値と第3値の合計を差し引いて、この値をもつて流れ抵抗の比較値とした。

2.4 樋内部の粒体の流れ模様の観測

粒体の示す内部の流れ模様の大体の傾向は装置Ⅰを使用すると容易に推察されるが、運搬物の相違から詳細の点では当然違っているもので、装置Ⅱの樋壁の一部をガラス張りとして着色粒体の流れを追跡したり、粒体群中に水平に細棒を並べ挿入してその外端の動きを測値したりする等の方法で具体的に確めた。

2.5 側壁圧の測定

装置Ⅱの樋壁の一部を可動壁とし第4図のようにして下方を蝶番とし上端の変位を0.5mmにするようにダイヤル・ゲージで押えバネの動きを監視しながら、拡大レバーを使つて側壁圧をダイヤフラム・ケージに移し、望遠鏡でマノメーターを讀取つて、粒体の静止時と移動時の壁圧を樋の両側について計測平均し、その水平分力Bを求めた。

この場合動圧は脈動値として現われて相当にばらつくので、各値は測値20回の平均値である。

第4図
側壁圧測定
装置

第5図
砂利 G₁ の軸
長頻度

第1表

種別	符号	軸長比	等価直径	比重		摩擦角		安定角
				真比重	見掛比重	側板	曳板	
砂利	G ₁	17.90 : 11.40 : 7.40	11.50	2.65	1.65 ~1.70	23°18'	35°00'	40°00'
	G ₂	8.90 : 5.77 : 3.46	5.69	2.97	1.53	28°00'	36°00'	39°00'
	G ₃	1.19 : 0.87 : 0.70	0.89	2.74	1.43	35°40'	35°40'	34°20'
石炭	C ₁	14.37 : 9.60 : 6.39	9.59	1.65	0.77 ~0.80	28°10'	31°30'	41°40'
	C ₂	8.95 : 5.33 : 3.51	5.56	1.65	0.77	27°30'	30°25'	44°00'
	C ₃	5.48 : 3.88 : 2.31	3.36	1.70	0.80	27°10'	35°55'	41°40'

** 2/

2.6 粒体試料

粒体としては楕円形の海岸砂利 G₁ を洗浄乾燥して主用し、補助として相似形の小砂利 G₂・G₃ と、有煙炭塊の相似形である C₁・C₂・C₃ を用いた。

試料の諸元を第1表に、G₁ の5000個についての長短各軸長の頻度を第5図に例示する。

3. 実験の結果

3.1 流れ係数と流れ抵抗

装置Ⅱでチェーン代用の曳板として樋巾と同一巾で荒削りした平木板で静摩擦係数0.70のものを、樋側壁として仕上げ削

りの木板で静摩擦係数0.43のものを利用し、砂利 G₁ を運搬粒体とした場合、積高さ H、樋巾 B と関係する流れ係数 $\eta = G_L / B \cdot H \cdot l \cdot \gamma \dots\dots$ (G_L は排出重量、 l はチェーン曳出し長、 γ は粒体の堆積している見掛け比重) ……と、この G_L を排出する場合の流れ抵抗 F と、この F に基づいて計算した積込胴部単位重量当りの抵抗値 $F/B \cdot H \cdot L \cdot \gamma \dots\dots$ (L は胴部長) ……の値を第6図に、上と同一側壁板で曳板のみを平板に1.5cm 角材を8cm 間隔で横に横づけしたものに取換えた場合と、曳板は変えず側壁のみを静摩擦係数0.28のガラス板に取換えた場合とを別に加え、流れ抵抗を実際の流れ量単位重量当りとした $F/G_L \dots\dots$ ($G_L = B \cdot H \cdot L \cdot \gamma \cdot \eta \dots\dots$) で表わした例を第7図に示す。

3.2 流れ模様

上表面の粒体の流れ模様は第3図の通りであるので、この表面の流れ分布と内部の動きとの関連を求めると第8図の例示となる。図の右下は積高さの低い場合、下左は高い場合で、上図は積高さの増加に伴う上表面流れと○●点の位置にそれぞれ相当する縦断面内の流れ速度の変化を示すもので、積高さが増すとともに粒体の流れは均一を欠き相互間に滑りを生じ、上表面・縦断面のそれぞれの流れ分布曲線は漸次屈曲の度合を増して流れ係数 η の減少を来し、ある積高さを越えると曳板に近接する粒体層のみ流れて、上層は全体として流れは停滞して上表面の流れ分布曲線をかえつて平滑化し、縦断面の流れ曲線を局部において著しく屈曲させて来ることが理解される。

第9図は装置Ⅰによつて求めた積高さと η 曲線の求め方とその結果の一例であり(側壁角をもつた場合)、第6図の η 曲線には示していないような積過ぎによる η 値の急減現象を破線によつて提示したものである(第8図の下左図のようになるとこの急減現象を示す)。

第6図 流れ係数と積込単位重量
当りの流れ抵抗

第7図 実流れ量単位重量当りの
流れ抵抗

左 第13図 流れ抵抗の係数値

右 第14図 側壁の動・静圧

16cm の場合について計測して例示すると第12図となり、積高さの増加につれて振られる度合の変化する傾向は第11図とほぼ一致している。図で θ_L は長軸線を樋軸と平行に、 θ_R は長軸線を樋軸に直角に置いた場合の回転角であり、 $\theta_{B/2} - \theta_0$ は樋巾の中央と側壁面で示すそれぞれの回転角の差額であり、---線はこの差額の軸方向別のものの平均である。

3.4 側壁圧

流れ模様と流れ抵抗とをもつと具体的に相関させるためには側壁圧の測定結果によると便利である。

第7図に例示した樋巾・積高さ・流れ抵抗の関係を実験の範囲でまとめると、

$$F/G_L = a + be^{-cB}$$

となつて、樋巾の絶対値 B を含まない初項と、 B を含む次項とに分けて整理され、 $a \cdot b \cdot c$ の各係数は H/B の関数として第13図に示される。

このことは流れ抵抗が、粒体の流れ模様に関係せず、樋巾・積高さについて相似則の適用される部分と、そうでない部分とから構成されることを意味するようなので粒体群の静止時と移動時の側壁圧 S と D を計り、 D/S を求めると第14図の例示となつて、積高さにしたがつて増加する静側壁圧の外に、粒体の動きに相応して増減し樋巾と逆比する動側壁圧の存在が確認される。

なおこの動側壁圧中には粒体の動きによる振動や沈下によるものが付加されて現われていることも当然考えられるが、同一の比積高さ H/B では樋巾の狭い方、言い換えれば積高さの低い方がかえつて動圧が大ききことで、その量は存在しても僅少であることに間違いなく、事実激しく振動して見ても図に示す傾向を逆にする程の影響はもっていないので、とくに区別して算定しなかつた。

4. 考 察

この実験に使つた砂利のような粒体では、流れに対する抵抗因子として凝集・粘着の両力は無視してよいので

結局内外摩擦力を考慮すれば足りる。

粒体群が流れるにしたがつてその内部で相互に滑るとすると、滑るためには粒体群の噛合構造が変化する必要があり、この構造変化の結果として粒体の振れや傾斜運動を生ずる。

粒体に振れ傾斜運動が強制されるとその結果の一つとして流れ方向に直角な圧力を発生する²⁾³⁾⁴⁾。

樋の中の粒体では上表面は自由面なので、浅層のもの程上方への転動が容易であり、側壁への横圧力の発生はそれだけ弱められている可能性があるが

既掲の結果では比積高さが同一でも実際の積高さが低くて樋巾の狭い方がより確実に動側壁圧の存在を示し、静側壁圧に対する割合も多くなつており、構造変化抵抗が流れ抵抗の主要部分を占めていることを例記しているので、横圧力の発生が以上の可能性によつて目立つ程弱められていないことを示している。

この横圧力の発生と結びついた構造変化抵抗を認めて初めて、動側壁圧の変化と流体の流れ模様とがよく相関している事実や、樋巾や曳板の性状寸法が流れ模様——進んでは流れ抵抗に強く影響している理由が説明されたと考える。

試みに砂利 G_1 の崩壊角 α を 60° 前後と仮定し⁵⁾、クロン土圧論にしたがつて静側壁圧の水平分力 E を略算すると、比積高さ $H/B \geq 1$ 以下では両側壁面について

$$\begin{aligned} E &= 2 \cdot G_w \cdot \frac{\sin(\alpha - \varphi) \cos \beta}{\cos(\alpha - \beta - \varphi)} \\ &= 2 \cdot G_w \cdot \frac{\sin(60^\circ - 40^\circ) \cos(13^\circ \sim 20^\circ)}{\cos[60^\circ - (13^\circ \sim 20^\circ) - 40^\circ]} \\ &\cong 0.74 \cdot G_w = 0.42 \cdot W \frac{H}{B} \end{aligned}$$

となる。ただし G_w = 粒体楔重量、 W = 積込粒体重量、 φ = 粒体の内部摩擦角で安息角に等しいとした値、 $\beta = 90^\circ + \delta' - \theta$ で $\delta' = \left(\frac{3}{4} \sim \frac{1}{2}\right) \varphi$ 、 θ = 壁面の水平となす角。

この静側壁による実際の流れ粒体単位量当りの流れ抵抗は $0.42 \cdot \frac{H}{B} \cdot \frac{f}{\eta} \dots\dots (f \text{ は側壁摩擦係数}) \dots\dots$ となる。

クロン土圧論による算式はその性質上略値しか与えないが、一応の目安をつけるには使える。

上式に既知の f や η を代入して得た結果と $F/G_L = a + be^{-cB}$ 式の a 値とを比較すると、ほぼ近似しているのでこの a を静側壁圧による摩擦抵抗値と見て大差ないこととなり、結果として be^{-cB} が別の原因、すなわち動側壁圧として現れた粒体群の相互滑りによる摩擦抵抗に相当するとして推定してよい。

第15図 等価直径と積込量単位当りの流れ抵抗

以上の兩種の抵抗比を実験の範囲で $H/B \leq 1$ の場合について求めると、

$$\frac{7.8 \cdot f^2 \cdot \left(\frac{H}{B}\right) e^{-f \left(\frac{H}{B}\right)^{0.253} \cdot B}}{0.42 \cdot \left(\frac{H}{B}\right) \cdot f} = K \cdot f \cdot e^{-f \left(\frac{H}{B}\right)^{0.253} \cdot B}$$

となる。この式で K は粒体の内部摩擦角とチェーンの形状による係数である。

5. 既知の報告との関連

既知の報告では、側壁の静圧に触れ⁹⁾、この静圧に基づいたチェーン牽引力を算定し⁷⁾⁸⁾、粒体の大きさと流れ抵抗との関係に論及し⁹⁾、さらに進んで粒体の種類や大きさとチェーン・樋の形状・寸法との関係から本報告の流れ係数と同様な係数を提示しているが、動側壁圧を確認し、これと流れ模様、したがって粒体群の噛合構造の変化による抵抗との結びつけをしているものは見受けられない。

なお実際にコンベヤーの設計と使用条件の選定にあたっては、粒体が一様に流れるように務めて、この構造変化抵抗をなるべく排除するのが建前であり、この建前を守って運転されているものにとつてはこの抵抗は当然僅少値であるので、無視されても差支えなく、このような場合も多いと考える。

6. 実験結果の普遍性

既掲の実験は粒体として砂利 G_1 のみを使用しているので普遍性に乏しいので、この G_1 と形状がほぼ相似し、粒度線もよく似ている小粒の砂利の $G_2 \cdot G_3$ と同様の選択をした石炭 $C_1 \cdot C_2 \cdot C_3$ を新しく加え、それぞれの平均等価直径と樋巾との比を求め、この比と積込重量単位当りの流れ抵抗とを $H/B=1$ の場合について例示すると第15図となるので、表面のひつかかり状態と形状が相似し粒度曲線の形も似ている異径の粒体群についても、既掲の実験結果の示すところを延長して適用出来るものと考

える。

ただし粒体中に大塊がありチェーンに挟まれて實際上チェーン掻き羽根の一部を構成するような場合は、この掻出し作用が極めて強く影響して流れを良好とするので、以上の結果をそのまま機械的に適用することは出来ない。

7. 結 言

以上を要約するとつぎの通りである。

(1) 極めて短かい樋を使つてもコンベヤー樋の中の粒体の流れ性能についての究明が出来るので、その設計や使用条件の検討に簡便である。

(2) $\sqcup$ 型の樋について粒体の流れ模様と側壁圧とを調べて流れ抵抗との関連を求め、この流れ抵抗(樋底摩擦によるものを含まない)が側壁への粒体静圧によるものと、粒体の相互滑りによるものととの合成であるとし、特に後者が粒体の噛合の強弱に関係する点で樋巾寸法の間数であり、チェーンに乗る崩壊角によつて境される山形堆積部の安定——したがってチェーンの掻出し作用の伝達の強弱に関連する点でチェーン構造の間数であり、粒体の相互流れ速度が大きく違う程大きな値をとり、流れ抵抗の主要部分を占めるものと推察した。著者の例示では両者の比は最大値で 1.3~2 倍となつた。

(3) 異径であつても内外摩擦に関係する表面の性質や形状が相似し、その粒度配合の頻度曲線もよく似ている粒体群の噛合の強弱は、平均等価直径と樋巾との比で代示される。

(4) コンベヤー樋とチェーンの設計にあたつては、その使用条件と運搬粒体を考慮して、上述の滑り抵抗を消滅させるように留意すべきである。

なお装置 I を利用すると流れの機構を解析する資料が求められて便利であるが、紙面の都合上 1 例の外は省略した。

参 考 文 献

- 1) 鷹部：構造力学V，昭和29年 130~137頁。
- 2) 青山・下村：日本鉱業会誌 59巻 609号 162頁。
- 3) J. Tayler: T. I. Min. Eng. Vol. 59 p. 168.
- 4) Cam: Earth Pressure Walls and Buis. 1916 p. 209.
- 5) 鷹部：構造力学V，昭和29年 112~119頁。
- 6) 加藤：日本鉱業会誌 51巻 603号 419頁。
- 7) A. Vierling・M. Lamm: V. D. I. Bd. 83 S. 499~502.
- 8) Зенков Р. Л.: Теория и расчет конвейеров с Перфорированной лентой, Сборник «Новые конструкции конвейеров». Книга 3, ВНИИТМАШ. 1949.
- 9) G. Hanffstengel: Die Förderung von Masseugütern. 1921 Bd I S. 70.