縦型無隔膜ガス銃の開発及び性能評価

江川祐也^{*1}, 梅田晃樹^{*1}, 渡辺圭子^{*2}

Development and Performance Evaluation of Diaphragmless Vertical Gas Gun

Yuya EGAWA^{*3}, Kohki UMEDA and Keiko WATANABE^{*3} Department of Mechanical Engineering, Ritsumeikan University
1-1-1 Nojihigashi, Kusatsu, Shiga, 525-8577 Japan

Crushing compression test of sand has been done under static loading conditions in the fields of geotechnology. However, measurement method of experiment has not been established at high speed impact due to the various parameters of sand (grain diameter, density, material, moisture content) which make it more complicated. The development and performance evaluation of projectile accelerator for high speed experiment had been performed for the study of crushing phenomenon of the sand. The diaphragmless vertical gas gun do not use the diaphragm that will affect the experiment had been developed and is able to handle target material with fluidity.

Key Words : Gas Gun, Diaphragmless, Vertical

1. 緒 言

かつて砂は破碎しないものと考えられており、巨大構造物が建設されてきた。しかし、近年では砂の破碎の影響を考慮した研究が地盤工学において進んでいる⁽¹⁾。砂の破碎試験は単粒子と集合体に分け行われている。単粒子の破碎においては一軸圧縮試験機を用い、集合体の破碎においては三軸圧縮試験機を用い評価する方法が一般的であり、静的負荷での砂への破碎試験は多々報告されている。しかし、高速衝突における砂の破碎試験は応力や強度の測定が困難であることや、砂自体のパラメータ（粒径、密度、砂粒子の材質、含水率）が多く複雑なため研究が進んでいない。そのため、物体の高速衝突・貫入における粒子破碎の研究は非常に意義がある。

高速試験を行うには高速で物体を発射させる飛翔体加速装置が必要となる。飛翔体加速装置にはガス銃、火薬銃、二段式軽ガス銃などの種類があり、対象となる速度やターゲットなどにより使用する装置を選別する必要がある。今回は最大 500 m/s での試験を想定しているため、ガス銃を選択した。飛翔体

加速装置は加速距離を長く取る必要があるため、空間的制限の少ない横型の装置が一般的である。しかし、ターゲットとして流体的挙動を示す砂を扱うため縦型である必要がある。また、隔膜によりガスを高圧に保ち、その破膜により飛翔体を加速するのが一般的であるが、その方法では隔膜の衝突により試験後の砂層の状態を変化させ、試験結果に影響を及ぼす可能性がある。そこで、縦型無隔膜ガス銃の開発及び性能評価を行った。

2. 設 計

2・1 縦型無隔膜ガス銃 開発した縦型無隔膜ガス銃は一般的なガス銃と同じく高圧室、加速管、試験室で構成されている（図 1）。しかし、大きく異なる点が二つある。一つ目は縦型という点である。縦型にすることで流体や砂などの流動物質を扱うことができる。二つ目は無隔膜という点である。通常は高圧室と加速管を遮断するのに隔膜を使用する。隔膜の破断圧を超える圧力がかかると、隔膜が破断して飛翔体後部に高圧ガスが流れ込み、飛翔体が加速される。その際、隔膜も一緒に飛ばされるため試験結果に影響を及ぼしてしまうことがある。そこで隔膜を使用しない方法を考案した。高圧部断面の概略図を図 2 に示す。これは隔膜の代わりにピストンを用いて高圧室と加速管を遮断する方法である。高圧室（オレンジ色領域）と補助高圧室（青色領域）の圧力が一定

^{*1} 学生員、立命館大学大学院理工学研究科
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1 丁目 1-1)

^{*2} 正員、立命館大学
E-mail: rm0014re@ed.ritsumeikan.ac.jp

に保たれているときは遮断されているが、補助高圧室の高圧ガスを一気に排気することにより、ピストンが図2の矢印方向に後退する。それにより飛翔体後部へ一気に高圧ガスが流れ込み、飛翔体が加速するという仕組みである。また、ピストンを用いることで使い捨ての隔膜とは違い、繰り返し使用できるため作業効率が上がると共に、環境負荷が低くなるという利点もある。

飛翔体の最高速度が500 m/s以上となるように、以下の方法で部品サイズを決定した。飛翔体速度 v を決定するには6つのパラメータ（飛翔体質量 m 、加速管断面積 S 、高圧室ガス圧 P_0 、高圧室容積 V_0 、ガス比熱比 γ 、飛翔体初期設置位置からの移動距離 x ）がある。次の3つの方程式（1）～（3）

運動方程式

$$m \frac{dv}{dt} = SP_0 \quad (1)$$

状態方程式（断熱変化）

$$P(x)V^\gamma(x) = P_0V_0^\gamma \quad (2)$$

飛翔体背後の空間容積

$$V(x) = V_0 + Sx \quad (3)$$

より、飛翔体速度 v を求める式は次のようになる。

$$v = \sqrt{\frac{2P_0V_0^\gamma}{m(\gamma-1)} \{V_0^{-\gamma+1} - (V_0 + SL)^{-\gamma+1}\}} \quad (4)$$

式（4）は理論的な飛翔体速度であり、実際は摩擦等の影響を受けるため経験上8割程度の速度になる。

これまでの研究条件との統一性のため、飛翔体の質量 m を16 g、飛翔体の直径（加速管内径）を15 mmに決定した。また構造上の制約として、加速管長さと同高圧室高さの合計は3 m以下にする必要があった。高圧室の最大ガス圧を10 MPa、使用ガスを窒素ガスとし、計算の結果、高圧室容積を $5.09 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ 、加速管長さを2 mと決定した（表1参照）。以上の機構で式（4）より速度は理論上625 m/s、実際は速度は500 m/sとなる予定である。

2・2 速度計測器 飛翔体の速度は、コイルを用いた非接触型の速度計測器を加速管先端部に取り付け計測した。その概略図を図3に示す。20 mm間隔で設置したコイルに磁石を搭載した飛翔体が通過するときに発生する誘導起電力をオシロスコープで取得する。オシロス

コープの波形より飛翔体がコイル間距離を移動するのに要した時間を求め、コイル間の距離から飛翔体速度を算出できる仕組みである。

Table 1 Design parameters

Projectile mass: m [g]	16
Cross-sectional area of launch tube: S [m ²]	1.77×10^{-4}
Gas specific heat ratio (nitrogen): γ	1.402
Maximum gas pressure: P_0 [MPa]	10
Volume of high pressure chamber: V_0 [m ³]	5.09×10^{-3}
Length of launch tube [m]	2

Fig. 1 Schematic diagram of gas gun

Fig. 2 Schematic diagram of pressure vessel

Fig. 3 Speed measuring instrument

また、各コイルの上方には板が設置されており、飛翔体を駆動する高圧ガスがターゲットに到達するのを阻止するバッファの役割を果たしている。さらに、最下部にはアルミ板が設置されており、ターゲットからの噴出物や飛翔体破壊時の破片から速度計測器を保護するシールドの役割を果たしている。

3. 性能評価試験

性能評価を行う点は主に二つある。一つ目は目標速度である。設計時に用いた飛翔体速度 v を求める式(4)は理論式であり経験則を用いて目標最高速度を500 m/sに設定したが、期待する速度が出ない可能性もある。目標速度を達成するために性能評価試験で変更するパラメータはいくつかあるが⁽²⁾⁽³⁾、これまでの試験の統一性のため今回は飛翔体の外径寸法を変更し速度への影響を評価する。性能評価試験に使用する飛翔体を図4に示す。実際の試験と条件を揃えるため、性能評価用飛翔体の質量・寸法を試験用飛翔体と同様にした。飛翔体はインパクト部分と胴部分の2層構造になっており、速度計測のため飛翔体最後部にネオジウム磁石を搭載している。重心が飛翔体の中心に位置するとターゲット衝突時に飛翔体が傾いて貫入してしまい、試験を正確に行うことができない恐れがあるため、重心は前方に位置する必要がある。そこで、インパクト部分に黄銅を、胴部分に比重が軽い部材を使用し、重心を飛翔体先端から約6 mmの位置に設定し飛翔体の姿勢を安定させた。

飛翔体外径は15 mmから0.01 mmずつ寸法を減少させ各寸法に対して試験を行う。そのため、飛翔体外径と加速管内径はほぼ同じ寸法となり、飛翔体を加速管に押し込むように設置しなくてはならない。そのため、飛翔体胴部分に硬い材料を使用すると加速管内壁がダメージを受ける。また、飛翔体外径を小さくすると加速管内部のシールド性が低下する。そこで、加速管内壁のダメージを減少させ、発射時に高圧で負荷がかかることにより胴部分が広がりシールド性を高めることができるポリエチレンを使用した。

二つ目は速度制御である。速度制御はガスの圧力により行う。ガスの圧力を正確に制御するための装置を図5に示す。図5の操作パネルにより高圧室・補助高圧室に出力されたそれぞれの高圧ガスの圧力は圧力容器付近に設置されている圧力変換器により測定する。そして、測定された圧力は図5右下の赤円部分によりデジタル表記し、正確に読み取ることができる。しかし、正確に同じ圧力を高圧室に出力しても速度が一定にならず、高速になるにつれ速度誤差が徐々に大きくなる。この速度誤差は試験結果に直接影響するため、可能な限り少なくする

必要がある。そこで、本装置では速度誤差の目標数値を5%以下とし、速度に対する性能評価を行うこととした。

謝 辞

本研究は、JSPS 科研費 24560978 の助成金を受けたものであり、ここに記して謝意を表する。

文 献

- (1) Shahnazari, H. and Rezvani, R., Effective Parameters for the Particle Breakage of Calcareous Sands: An Experimental Study, *Engineering Geology*, Vol. 159 (2013), pp. 98-105.
- (2) Yokoo, M., Kawai, N., Nakamura, K.G. and Kondo K., Hugoniot Measurement by Hyper-Velocity Impact at Velocities up to 9 km/s Using a Two-Stage Light-Gas Gun Under Optimized Shot Conditions, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.35, No.12 (2008), pp. 1878-1883.
- (3) Francesconi, A., Pavarin, D., Bettella, A. and Angrilli, F., A Special Design Condition to Increase the Performance of Two-Stage Light-Gas Guns, *International Journal of Impact Engineering*, Vol.35, No.12 (2008), pp. 1510-1515.

Fig. 4 Projectile for performance evaluation

Fig. 5 Operation panel