

(10) 走行カプセル車衝突停止時の衝撃力検討

住友金属工業㈱ 岡本政信

1. はじめに

空気カプセル輸送システムは輸送物を車輪付カプセル（以下カプセル車と称す）に積載し管路内を気流に乗せて輸送する技術であり、すでに実用化されている¹⁾。Fig.1 は、本技術をトンネル工事のずり排出輸送に適用した場合を例としたシステム概念図である。

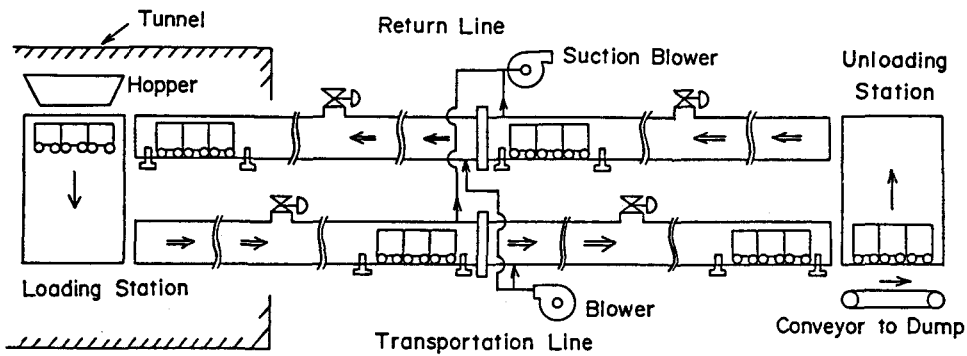


Fig.1 Schema of Soil Removal System for Excavation Work

このシステムでは、カプセル車の管路内での加速、走行および制動は主に管路内の気圧の制御によっておこなわれる。また、輸送物の積荷や荷降しは、ステーションと称する設備で断続的におこなわれる。

ところで、積荷や荷降しのためには管路内走行カプセル車を減速し特定の位置に停止させる必要がある。しかし、管路内気圧の制御のみでこれを迅速かつ正確におこなうことは困難であり、実際には、気圧の制御でカプセル車を一定速度以下に減速した後ストッパーにより衝突停止させている。そのときのカプセル車の速度はたかだか2m/s程度であるが、発生衝撃力はかなり大きくなりカプセル車やストッパーの強度設計での支配的条件となる。そこで、トンネル工事のずり排出輸送に実際に適用されたシステムにおいて、発生衝撃力を正確に評価するための手段として、バネ・質点系モデルの適用を試みたので報告する。

2. 衝突現象の定式化

2.1 構造系のバネ・質点系モデル

Fig.2、Fig.3 にそれぞれカプセル車およびストッパーを示す。カプセル車は矩形断面管路走行用の形状を持つ。本体は鋼板を溶接加工により箱形容器とし必要箇所を補強し、これにゴム製車輪を取付けている。なお、カプセル車は3両で1列車として走行し、衝突停止時は先頭車両の衝突面がストッパーの衝突面と衝突する。ストッパーは、衝突面を持つ鋼製の中間衝突物と運動エネルギーを消散する緩衝装置とから成る。中間衝突物は、衝突停止時のみ衝突面が管路内に配置され、衝突後にガイドロールにより緩衝装置の方へ移動する。また、緩衝装置は直接運動エネルギーを消散するオイルダンパーとその負荷を軽減するゴムバッファとで構成される。さらに、オイルダンパーにはストロークを戻すためのバネが取付けられている。

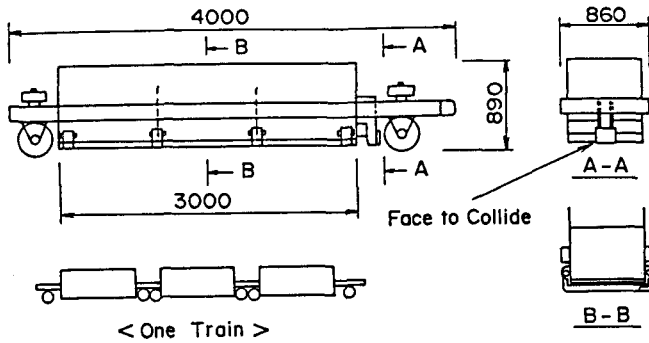


Fig. 2 Capsule Vehicle

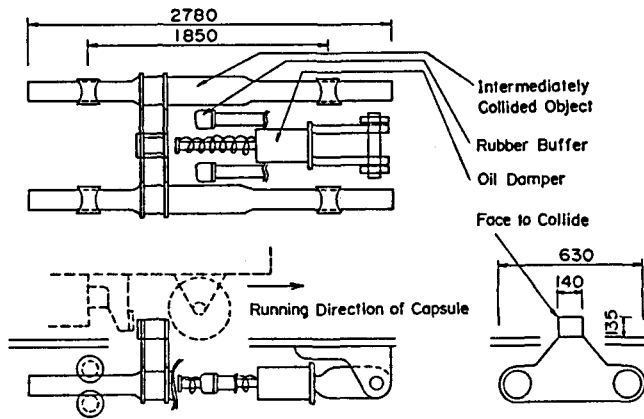


Fig. 3 Stopper

ここで、カプセル車および中間衝突物をバネ・質点系モデルで表す方法としては有限要素法などによる離散化手法が考えられるが²⁾、今回の場合、それぞれの衝突面において衝撃力発生方向に静的に荷重を載荷すると、発生する変位は荷点近傍での局部変位に限られる。そこで、カプセル車および中間衝突物をそれぞれ一質点としその先端にバネを持つものとしてモデル化する。ただし、バネ定数は静的な荷重・変位関係より求め、減衰は無視した。この仮定のもとでの全体のモデルをFig. 4 に示す。

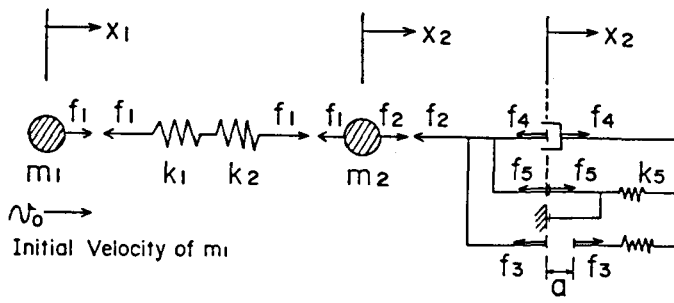


Fig. 4 Spring-Mass Model

2.2 衝突時の運動方程式

質点 i の質量を m_i 、またその変位 x_i を衝突直前の位置を原点として Fig.4 に示すように定める。このとき、衝突後の各質点の運動を考えると、以下の方程式を得る。

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \quad (= r_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 = f_2(x_2, \dot{x}_2) - f_1(x_1, x_2) \quad (= r_2) \end{cases} \quad \text{-----(1)}$$

外力は次のように規定される。

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2) = \begin{cases} 1/(1/k_1+1/k_2) \cdot (x_2-x_1), & (x_2-x_1) \leq 0 \\ 0, & (x_2-x_1) > 0 \end{cases} \\ f_2(x_2, \dot{x}_2) = -f_3(x_2) - f_4(x_2, \dot{x}_2) - f_5(x_2) \\ f_3(x_2) = \begin{cases} f_3(x_2-a), & (x_2-a) \leq 0 \\ 0, & (x_2-a) > 0 \end{cases} \\ f_4(x_2, \dot{x}_2) = \begin{cases} c(x_2) \cdot \dot{x}_2^2, & x_2 \geq 0 \\ 0, & x_2 < 0 \end{cases} \\ f_5(x_2) = f_{50} + k_5 x_2 \end{cases} \quad \text{-----(2)}$$

ここで、式(1)を次のようにマトリックス表示する。

$$M \ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{r}, \quad \ddot{\mathbf{x}} = [\ddot{x}_1, \ddot{x}_2]^T, \quad \mathbf{r} = [r_1, r_2]^T \quad \text{-----(3)}$$

$$\ddot{\mathbf{x}} = M^{-1} \mathbf{r} \quad \text{-----(4)}$$

これは2階の微分方程式であり、次のように1階の微分方程式に変換する。

$$\mathbf{u} \equiv [\mathbf{x}^T, \dot{\mathbf{x}}^T]^T = [x_1, x_2, \dot{x}_1, \dot{x}_2]^T \quad \text{-----(5)}$$

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = [\dot{\mathbf{x}}^T, \ddot{\mathbf{x}}^T]^T = [\dot{\mathbf{x}}^T, (M^{-1} \mathbf{r})^T]^T \quad \text{-----(6)}$$

式(2)より \mathbf{r} は \mathbf{u} の関数であり、したがって、式(6)は \mathbf{u} の関数として次のように表される。

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} = G(\mathbf{u}) \quad \text{-----(7)}$$

この方程式は初期条件が与えられれば解くことができ、実際には数値計算により求まる。初期条件は、カプセル車の衝突直前の速度を v_0 とすると、次のように設定される。

$$\mathbf{u}(0) = [0, 0, v_0, 0]^T \quad \text{-----(8)}$$

3. 実験によるモデルの妥当性検証

本モデルの妥当性を検証するため、衝突実験を実施し実験結果と計算結果とを比較検討した。実験装置を Fig.5 に示す。屋内に3%勾配を付けた鋼製走行路を設置し末端にストッパーを据えた。これに俵詰め砂を積載したカプセル車を重力により自然走行させた。走行路は衝突停止時に動かぬよう架構で固定してある。カプセル車の衝突面にはロードセルを取付け衝突時の衝撃力波形を測定した。また、走行路には光電スイッチを設置し衝突直前のカプセル車の速度を測定し衝突速度とした。衝突速度は、走行距離を変えることにより変化させた。なお、本実験に対応するバネ・質点系モデルでの諸条件は次のとおりである。

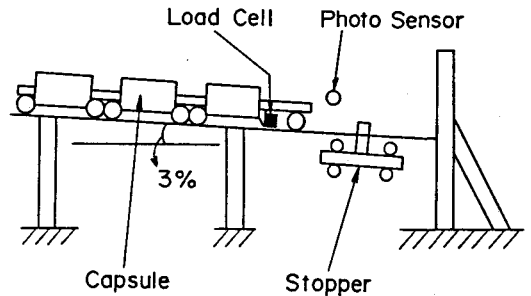


Fig.5 Experimental Apparatus

$m_1=6600.0\text{kg}$, $m_2=1000.0\text{kg}$, $a=7.0\text{cm}$

$k_1=66000.0\text{kgf/cm}$, $k_2=40000.0\text{kgf/cm}$

$f_{s0}=285.0\text{kgf}$, $k_5=20.33\text{kgf/cm}$

$$c(x_2) = \begin{cases} 0.114/(a_o(x_2))^2 \text{ kgf} \cdot (\text{s/cm})^2, & \dot{x}_2 \geq 0 \\ 0.001 \text{ kgf} \cdot (\text{s/cm})^2, & \dot{x}_2 < 0 \end{cases}$$

ここで、 $a_o(x_2)$ はオイルダンパーのオリフィス面積を表す。ゴムバッファーおよびオイルダンパーの特性である $f_s(x)$ 、 $a_o(x)$ はそれぞれFig.6、Fig.7の実線で表され、計算条件として用いる際には破線で示すように線形補完した。

ここで、衝突速度 v_0 が1.50m/sと1.70m/sの場合の衝撃力波形をFig.8とFig.9に示す。衝突直後の第1波はカプセル車と中間衝突物との鋼構造物間の衝突によるもので、いずれの場合も実験値と計算値は実用設計上妥当な精度で対応している。第2波はゴムバッファーの反力の影響によるもので、実験値と計算値にはかなりの相違が見られる。その原因として、Fig.6に示すゴムの力学特性が静的特性であるのに対し実際の動的特性はそれと異なる可能性があり、今後の検討課題である。以上より、本モデルの妥当性と問題点が明らかになり、設計への指針を得た。

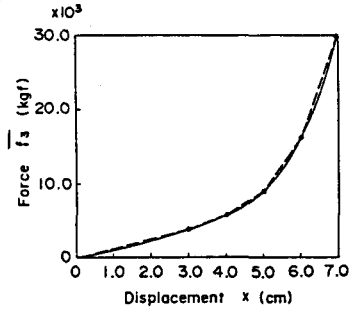


Fig.6 Properties of Rubber Buffer

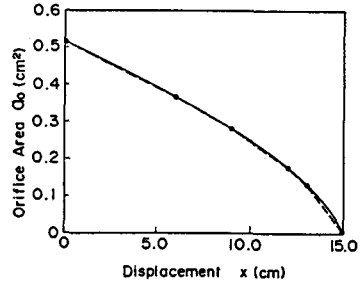


Fig.7 Properties of Oil Damper

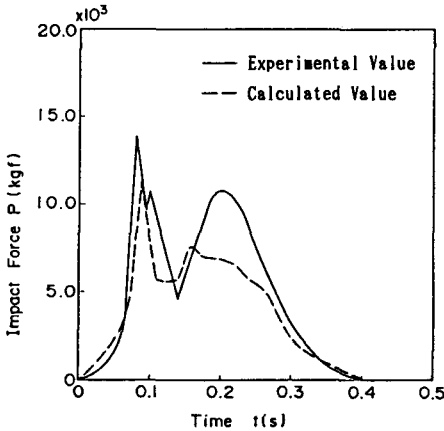


Fig.8 P vs. t ($v_0=1.50\text{m/s}$)

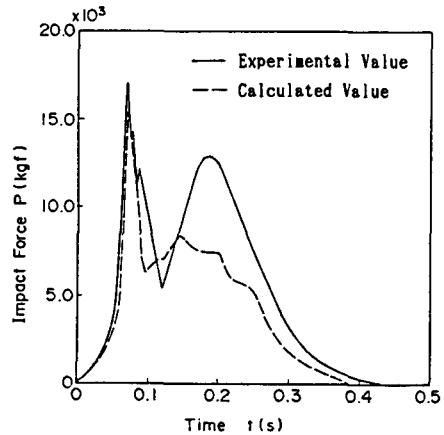


Fig.9 P vs. t ($v_0=1.70\text{m/s}$)

4. おわりに

カプセル車をストッパーにより衝突停止させるときの発生衝撃力を評価するための手段としてバネ・質点系モデルを適用した。モデルとしてはカプセル車とストッパーの中間衝突物をそれぞれ衝突部にバネが取付けられた一質点とした簡単なものであるが、実験との比較検討により、その有効性と問題点が明らかになり今後の設計への指針を得た。

参考文献

- 1) 小杉佐内:日本におけるカプセル輸送の現状,第5回混相流国際シンポジウム, p79, 1992.6
- 2) 増田陳紀:衝撃及び接触問題,有限要素法の理論と応用(II), p121, 日本鋼構造協会, 1988.9