

日本電信電話公社茨城電気通信研究所 正会員 田中邦男

正会員 有岡良祐

1. まえがき、

電電公社では、電話ケーブル一糸程度を埋設する場合、開削によらないで布設する工法の開発を行なっている。この工法の一つとして、断続的なハンマ作用により土中をさく孔する方法を研究している。この方法では、マシンの局部的な振動に起因して形成された動的な場の中を掘進して行くため、マシンの運動時のピッチに対して、重力の影響が顕著に表われてくるものと考えられるとともに、ピッチおよびヨーに対する偶然変動的な要素の影響も大きく加算されてくるものと予想される。この点を考慮して、土中運動の理論解析と実験結果とを対比し、その土中運動特性と精度の向上についての一考察を行なった。

2. 推進運動の解析、

地中穿孔機は、ハンマによる推進力にもとづいて、掘進計画線に沿って土中を移動する運動体であるが、この運動をピッチとヨーとに分け、まづピッチに対して解析することとして、図-1のマシンの掘進計画線の方角をY軸、マシンの掘進計画線よりの距離をZ軸にとり、 i 回のハンマ作用で $P_i(y_i, z_i)$ 点にあったマシンが、 $i+1$ 回目のハンマ作用によって、 $P_{i+1}(y_{i+1}, z_{i+1})$ 点にきた場合について考察する。

図-1のマシン中心線の角変化量 $(\Delta\psi_{i+1}-\Delta\psi_i)$ は、方向制御のための力学的な操作要素 f_i および重力による力学的要素 g_i 等にもとづく決定論的な量と、力学的にはコントロールできない偶然変動要素にもとづく非決定論的な量 $\delta\psi_i$ とよりなりたつものであつて、 $\Delta\psi_{i+1}=\Delta\psi_i+f_i+g_i+\delta\psi_i$ の関係が成立する。また、 P_i, P_{i+1} がY軸となす角は、 $\frac{\Delta\psi_{i+1}+\Delta\psi_i}{2}=\Delta\psi_i+\frac{f_i+g_i+\delta\psi_i}{2}$ となる。これより、 z_i, y_i に関する階差方程式(1)(2)が得られ、これを解くと、 n 回のハンマ作用によって、マシンが到達する点 $P_n(y_n, z_n)$ の位置が求められる。(3)(4)式で表わされる。

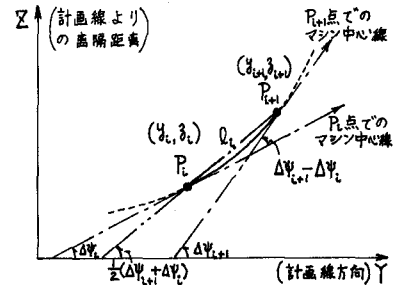


図-1. マシン位置の変化

$$z_{i+1} = z_i + l_i \sin \frac{\Delta\psi_{i+1} + \Delta\psi_i}{2} \approx z_i + l_i \left(\Delta\psi_i + \frac{f_i + g_i + \delta\psi_i}{2} \right) \quad \text{-----(1)} \quad y_{i+1} = y_i + l_i \cos \frac{\Delta\psi_{i+1} + \Delta\psi_i}{2} \approx y_i + l_i \quad \text{-----(2)}$$

$$z_n = z_0 + \Delta\psi_0 \sum_{i=0}^{n-1} l_i + \sum_{j=0}^{n-1} \left(f_j + g_j + \delta\psi_j \right) \left(\sum_{i=j}^{n-1} l_i - \frac{l_j}{2} \right) \quad \text{-----(3)} \quad y_n = y_0 + \sum_{i=0}^{n-1} l_i \quad \text{-----(4)}$$

第一次実験においては、 $f_i=0$ であり、一回ごとのハンマ作用にもとづく推進量 l_i および変化量 g_i は、各回ともに同一条件下にあるものと考えられるので、一定値 l_m および g_m と仮定できる。これより、 $y_0=0$ として(5)(6)式が定まる。この(5)(6)式を合成すると(7)式が得られる。同様に、ヨーに対しては、図-1のZ軸をX軸とし、かつ、角度 ψ を中におきかえて考察を行ない、 $f_i=g_i=0$ 、 $x_0=0$ とすれば、(7)式に対応した(8)式が求められる。

$$z_n = z_0 + n l_m \Delta\psi_0 + \frac{n l_m g_m}{2} + \frac{l_m}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (2n-1-2i) \delta\psi_i \quad \text{-----(5)} \quad z_n = z_0 + \Delta\psi_0 y_n + \frac{g_m y_n^2}{2 l_m} + \frac{l_m}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (2n-1-2i) \delta\psi_i \quad \text{-----(7)} \quad x_n = x_0 + \Delta\psi_0 y_n + \frac{l_m}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (2n-1-2i) \delta\psi_i \quad \text{-----(8)}$$

$$y_n = n l_m \quad \text{-----(6)}$$

こゝで、標本変量 $\delta\psi_i, \delta\psi_i^2$ の平均値、分散を、 $E(\delta\psi_i)=E(\delta\psi_i^2)=0$ 、 $V(\delta\psi_i)=\sigma_\psi^2$ 、 $V(\delta\psi_i^2)=\sigma_{\psi^2}^2$ とすると、 z_n, y_n の平均値、分散は、次式で表わされる。

$$E(z_n) = z_0 + \Delta\psi_0 y_n + \frac{g_m}{2 l_m} y_n^2 \quad \text{-----(9)} \quad V(z_n) = \frac{n(4n^2-1)}{12} l_m^2 \sigma_\psi^2 \quad \text{-----(10)} \quad E(x_n) = x_0 + \Delta\psi_0 y_n \quad \text{-----(11)} \quad V(x_n) = \frac{n(4n^2-1)}{12} l_m^2 \sigma_\psi^2 \quad \text{-----(12)}$$

また(7)(8)式等におけるマシンの平均推進量 l_m は、Y軸方向のマシンの運動式にもとづいて求めることができる。すなわち、マシンの重量を M 、推進時の土砂の抵抗力を F とすると、マシンの運動方程式は、 C, K を定数として、 $M \frac{dy}{dt} = -F - K \left(\frac{dy}{dt} \right)^C$ で表わせられるから、これを、 $C=2$ と仮定し、時間 $t=0$ のもとで $y=0$ 、 $\frac{dy}{dt}=u=u_0$ とすれば、

といて解き、この(13)の運動式により解析すると、マシンの限界推進力を P_{min} として、 l_m が求まり、(14)式で表わされる。

$$y = \frac{M}{Kq} \log \left[\cos \frac{\sqrt{KF}gt}{M} + \sqrt{\frac{K}{F}} u_0 \sin \frac{\sqrt{KF}gt}{M} \right] \quad (13) \quad l_m = \frac{Mu_0}{2Kq} \left(1 - \frac{P_{min}}{F + Ku_0^2} \right) - \frac{M(F + Ku_0^2)}{8K^2q} \left(1 - \frac{P_{min}}{F + Ku_0^2} \right)^2 \quad (14)$$

3. 実験結果との対比

ニューマチックパンチャー方式による地中着孔機（さく口径90 mm, 全長1,500 mm, 重量44.4 Kg）を使用し、図-2のような20 mのスペンを、土被り50~150 cmで、7箇所推進させる。一次さく孔実験を行ない、次の結果を得た。

(I) ピッチ、a) さく孔軌跡は直線ではなく、二次曲線となる。

b) 土質の変化に大きく影響される。c) ローム土でのさく孔のずれは30 cm以下である。d) 表土でのさく孔のずれは50 cm以下である。(II) ヨー、a) 計画線とのずれは単調増加の傾向があり、マシンの土中への貫入直後の姿勢(初期の姿勢)がその後の推進方向に大きな影響を与えている。b) ローム土でのさく孔のずれは15 cm以下である。c) 表土でのさく孔のずれは20 cm程度である。d) ピッチの変化に影響されない。

すなわち、一次実験結果によると、ピッチは二次曲線であり、また、ヨーは直線性が強く、理論解析結果の傾向と類似する。いま、一次実験結果の一例をピッチとヨーについてあげると、図-3、図-4のようになり、ピッチ； $y = 0.234y^2 - 1.88y - 2.54$ 、ヨー； $x = 0.028y^2 + 0.688y + 1.219$ (y は m, x は cm) の回帰式で表わされる。実験結果より、(7)(8)式の $g_m, l_m, \Delta\psi, \Delta\phi$ を推定すると、 $g_m \approx 5 \times 10^{-5} \text{ rad}$, $l_m \approx 1 \text{ cm}$, $\Delta\psi \approx -2 \times 10^{-2} \text{ rad}$, $\Delta\phi \approx 7 \times 10^{-3} \text{ rad}$ となる。また、標本変量 $S\psi, S\phi$ の分散 $\sigma_\psi^2, \sigma_\phi^2$ については、 $\sigma_\psi^2 \approx 3 \times 10^{-5} \text{ rad}$, $\sigma_\phi^2 \approx 2 \times 10^{-5} \text{ rad}$ 程度と推察される。

4. 制御と予測

(10)(12)式によると、 n 回のハンマ作用によって P_n 点に到達したマシンの計画線のずれのばらつきは、ピッチ $\sqrt{V(\beta_n)}$ 、ヨー $\sqrt{V(\alpha_n)}$ であり、 $\sqrt{V(\beta_n)} \approx (3l_m)^{\frac{1}{2}} y_n^{\frac{1}{2}} \sigma_\beta$, $\sqrt{V(\alpha_n)} \approx (3l_m)^{\frac{1}{2}} y_n^{\frac{1}{2}} \sigma_\alpha$ で表わされる。したがって、 y_n ごとに方向制御を行えば、 $y_n = \lambda y_{n-1}$ として、ばらつきは λ 倍 ($0 < \lambda < 1$) に減少し、精度は向上する。具体的な連続制御の例として、ヨーにおける操作要素 u_n を、 $u_n = -2\Delta\phi_n$ として操作を行えば、 $x_n = x_0 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n l_i \sigma_{\phi_i}$ より、 $V(x_n) = \frac{\pi}{4} l_n^2 \sigma_{\phi_n}^2$ となって大幅にばらつきが減少する。さらに制御を強化して、 $u_n = -2(\Delta\phi_n + \frac{x_n}{l_n})$ なる操作を行えば、 $x_n = x_0 + \frac{g_m}{2} S\phi_n$ であって、 $V(x_n) = \frac{g_m^2}{4} \sigma_{\phi_n}^2$ となり、 n に関係しなくなることが言える。また、方向制御に関連してマシン位置の予測が必要となるが、図-3、図-4の例について、マシンの推進過程を時系列の予測問題として検討すると、発進後、ピッチでは5回、ヨーでは数回の位置測定を行ない、マシンの軌跡を把握すれば、それ以後のマシンの位置を効率よく予測できることがわかる。このことより、事前にマシン位置を予測して適切な制御を行なうことが十分に可能と考えられる。

5. あとがき

地中着孔機についての力学的運動のみを検討する場合には、(13)式ならびにこれと同様な回転方向のマシンの運動式およびX軸のまわりの回転式により解析し得るが、ここでは力学的運動のほか、マシン位置のばらつきをも合せて検討することとしたため、(7)(8)式等を中心として解析した。今後は、この結果を基に、附加機能(方向制御機能、位置計測、推進距離の増加)を持たせ、より正確な推進を行なうよう研究を進めていく予定である。

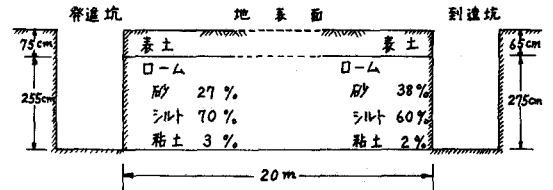


図-2. 推進区間の状況図

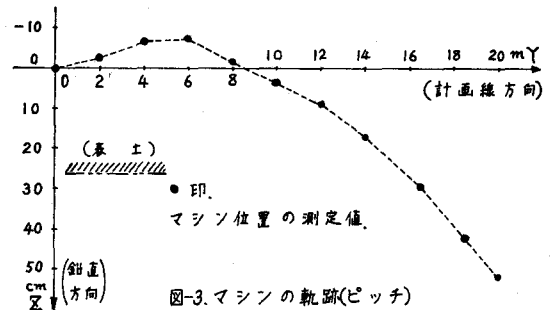


図-3. マシンの軌跡(ピッチ)

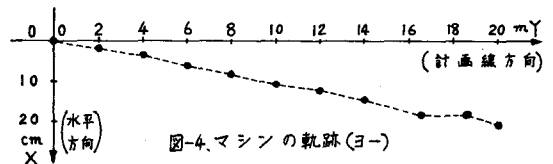


図-4. マシンの軌跡(ヨー)