

日本電信電話公社 茨城電気通信研究所 正員 田中 邦男
同 同 小林 英夫
同 同 堀内 敏行

1. まえがき

掘進中のシールド機には、地山反力の不均等性、シールドジャッキ圧の不均等性およびシールド機自体の運動特性のかたより、等起因したローリングが生じてくる。本報告は、電電公社で開発中の小断面シールド機における、カッタドラムの回転にもとづく定常的なローリング、および姿勢角変化時でのジャッキ圧の過渡現象等にもとづく衝動的なローリングについて、理論解析と実験結果とを対比し、小断面シールド機の一般的な回転式、ローリングの発生過程、等に対する一考察を行なったものである。

2. 小断面シールド機の回転運動方程式と一般解

シールド機の回転運動は、シールド機に固定した座標系の慣性主軸 x, y, z まわりの回転(図1)に、 ε 系の固定座標系に対する回転を付加したオイラー方程式が基本となるが、さらに土中における回転運動では、見掛け質量現象^(1,2)および回転速度に關係する粘性減衰現象等の影響を考慮しなければならない。このオイラー方程式の中で、 x 軸まわりの回転角中の変化がシールド機のローリング量を定めるが、特に小断面シールド機では、 y, z 軸まわりの慣性モーメントおよび y, z 軸方向の見掛け質量等がバランスしているものと仮定できるから、オイラー方程式は、次のような回転運動方程式で表示される。

$$(I_s + I_E) \frac{d^2\phi}{dt^2} + K_n \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^n + K_M \phi = N \quad (1)$$

ここで、 I_s, I_E はそれぞれ x 軸まわりのシールド機の慣性モーメントおよび見掛けの慣性モーメントであり、 K_n は回転速度 $\dot{\phi}$ の n 乗に比例する抵抗要素の比例係数、 K_M はシールド機の重心位置のかたよりで生じる回転力を規定する係数である。また、右辺の回転トルク N は、図2、図3により、式(2)で示す値であつて、この値がプラスとなる場合にローリングが生じる。

$$\Delta\omega \neq 0 : N = N_m = T_m - T_r \quad (2)$$

$$\Delta\omega = 0 : N = N_g = T_m + T_g + \mu M |m \times g| R - T_r$$

通常式(1)左辺第3項は微小であるので省略すると、 $\dot{\phi}$ は、速かに限界回転速度 $\dot{\phi}_m$ に収束し、 η をパラメータとして ϕ と t との關係が次のように求まる。($t=0$ で $\phi=\dot{\phi}=0$)

$$\phi = \frac{I_s + I_E}{N \eta K_n} \int_0^\eta \frac{\eta d\eta}{1 - \eta^n} \quad t = \frac{I_s + I_E}{N \eta K_n} \int_0^\eta \frac{d\eta}{1 - \eta^n} \quad (3)$$

定常的なローリングの場合、特に、 $n=1, 2$ とすると、

$$\phi = \frac{N_m}{K_1} \left\{ t - \frac{I_s + I_E}{K_1} \left[1 - \exp \left(-\frac{K_1}{I_s + I_E} t \right) \right] \right\} \quad (n=1) \quad (4)$$

$$\phi = \frac{I_s + I_E}{K_2} \cdot \log \cosh \left[\frac{\sqrt{N_g K_2}}{I_s + I_E} t \right] \quad (n=2)$$

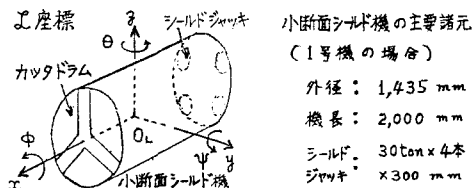


図1. 小断面シールド機に固定した座標およびラジルの主要諸元

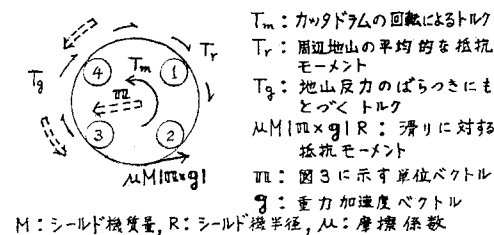


図2. 小断面シールド機のローリングに影響を及ぼす回転因子

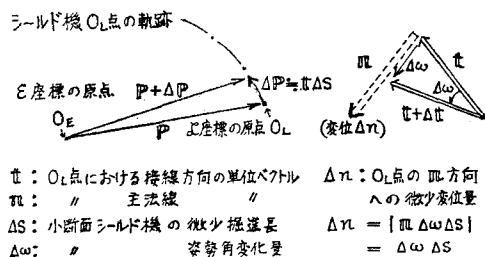


図3. 姿勢角変化時の挙動を表示するための諸記号

となり、また、衝撃的なローリングの場合、 $0 < t < t_0$ の t_0 時間に回転トルク N_g (一定値) が働くものとする、

$$0 \leq t \leq t_0: \phi = \frac{N_g(I_s + I_e)}{K_1^2} \left[\frac{K_1}{I_s + I_e} t - 1 + \exp\left(\frac{-K_1 t}{I_s + I_e}\right) \right] \quad (5)$$

$$t_0 < t: \phi = \frac{N_g(I_s + I_e)}{K_1^2} \left[\frac{K_1}{I_s + I_e} t_0 + \exp\left(\frac{-K_1 t_0}{I_s + I_e}\right) - \exp\left(\frac{-K_1(t-t_0)}{I_s + I_e}\right) \right]$$

となる。これらを図示すると、図4のような傾向を示す。

3. 実験結果との対比および考察

小断面シールド1号機について、ローリングに対する実験を行ない、カットドラムの回転にもとづく定常的なローリングおよびジャッキ圧変化の過渡現象にもとづく衝撃的なローリングを測定し、図5(A)(B)のような結果が得られた。これらは、それぞれ図4(A)(B)と同様な変動状態を示し、 $\dot{\phi}_m$ を基準とした直線状変化が主体となっている。

すなわち、定常的な T_m は 1 ton m 程度のトルク作用で、

$$\dot{\phi}_m \approx 2.5 \times 10^{-2} \text{ mr/sec}, \quad \phi \approx \dot{\phi}_m t \approx 2.5 \times 10^{-2} \cdot t \text{ mr} \quad (6)$$

なるローリングが生じ、また、衝撃的なジャッキ圧変化 $\dot{J} \approx 7 \times 10^{-2} \text{ ton/sec}$ にもとづくトルク作用に起因して、

$$3 < t < 25: \phi \approx \frac{N_g}{K_1} \left[t - \frac{I_s + I_e}{K_1} \right] \approx 0.14(t-3) \text{ mr} \quad (7)$$

のような式(5)才1式の近似式で表示される衝撃的なローリングが生じてくることを、確かめることができた。

特に、図5(B)の例では、ジャッキ圧変化とローリング発生との間に、3~6 secのタイムラグが存在し、ジャッキ圧変化に対応して、少し遅れてローリングしながら姿勢角が変化することがわかった。この場合のローリング量 3mr は、図3で示す π 方向への変位量 $\Delta \pi = |\pi \Delta \omega \Delta S|$ の中の一部分に変換されているものと推定される。

また、式(6)(7)を比較すればわかるように、衝撃的ローリングは、定常的ローリングに比較して回転速度が著しく大となっている反面、発生時間はきわめて短いことが言える。一般に、シールド機が $\Delta \pi$ 変位するのに要するエネルギー ΔE は、シールド機がローリングしながら変位するエネルギー ΔE_R と、ローリングしなくて、滑りながら変位するエネルギー ΔE_S との中で、どちらが小なる方の値をとる。したがって、 $\Delta E_R < \Delta E_S$ ならば、ローリングが生じる。すなわち、 $\Delta \omega \neq 0$ なる場合におけるローリング発生条件は、式(2)での $N_g > 0$ の条件のほかに、 $\Delta E_S > \Delta E_R$ なる条件が加わる。これらを不等式で表示すると、回転摩擦係数を省略して、 $M \cdot |\pi \times g| \cdot R > T_m + T_g - T_r > 0$ のように表わされる。この関係式を用いて、小断面シールド機でのローリング発生領域を図示すると、概ね図6のような範囲となることが予想される。

4. あとがき

小断面シールド機のローリングは、特に曲線部の掘進時に著しくなることが考えられる。今後は、ローリング発生条件を具体的に検討するとともに、ローリング修正方法および対策について研究を進めて行く予定である。

参考文献：1) 元良誠三、見掛質量について、造船協会会報 87号、2) S.H. Lamb, Hydrodynamics, Cambridge, ほか。

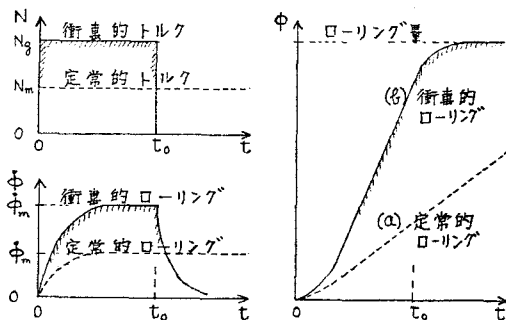


図4. N の作用による $\phi, \dot{\phi}$ の変化状況 (理論解析)

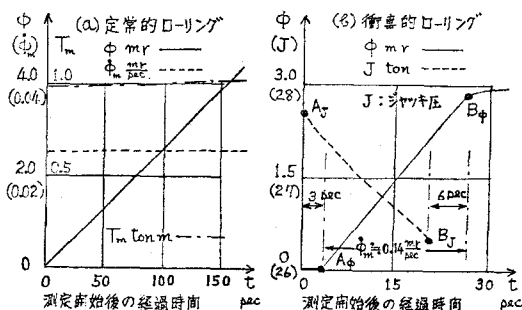


図5. 小断面シールド1号機のローリング状況 (実験結果)

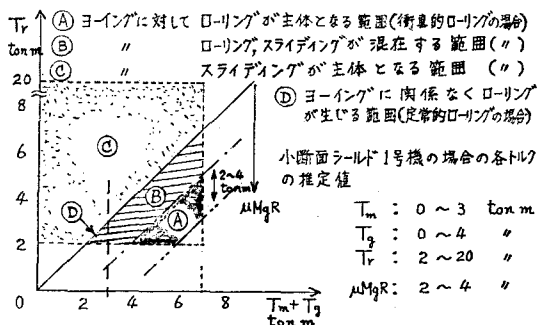


図6. 小断面シールド1号機に対するローリング発生領域の例