

日本電信電話公社茨城電気通信研究所 正会員○田中邦男

同 小林英夫

同 堀内敏行

1. まえがき

電電公社では、道路交通事情の悪化等に伴い、管路区間の無雨削工法の一環として、ヒューム管ライニング式シールド工法を開発した。この工法におけるヒューム管群は、リングによる連結構造体で、推進時の個々の単体相互の接触状態が異なるため、独特の推進特性を呈する。本文は、直線布設でのヒューム管の追従特性および蛇行特性ならびに、この蛇行にもとづくトンネルの伸長特性および推進力の伝達特性に対する考察結果を述べたものである。

2. ヒューム管の追従特性および蛇行特性

小断面シールド機に後続するヒューム管群は、プレスリングを通じて伝達されるマシンサイドよりの諸力、押管ジャッキによる断続的な推進力、および周辺地山よりの土圧等の諸作用にもとづいて、刻々と微少な変動を繰返しながら、この累積によって、ヒューム管群独特の推進運動を行なっている。この推進運動中のおもなものは、シールド機の姿勢角変化に順応する近接ヒューム管群の追従特性、およびシールド機の軌跡に大きく影響される蛇行特性である。前者は、カーブ点において、ヒューム管が画く線形がシールド機の軌跡よりも外側に、大まわりに曲る、迂回現象、および追従性不良の場合には、方向修正効果を減少させる拘束現象、あるいはヒューム管群が独自の運動を行なってシールド機を押しすべり現象、等をもたらすものである。また後者は、これらのシールド機とヒューム管群との抵抗要因差の相互作用により必然的に形成されるヒューム管連続ばり（地山トンネル）の初期たわみに対して、これを成長させ、蛇行現象の発生を促すものと推定される。（図1）すなわち、シールド機と後続ヒューム管群とは相互に影響しあいながら運動し、地山トンネルが形づけられる。この形状は、繰返して作用する推進力によって成長し、ヒューム管トンネルの蛇行が進行する。このようなシールド機と後続ヒューム管群との運動の運動作用の効果は、図2の実例で示すシールド機の通過軌跡と貫通後のヒューム管トンネル線形との相関性を検討することにより把握できる。図2によると、シールド機の通過軌跡とヒューム管トンネル線形との大きなうねりは一致し、両者の変位間に強い相関性があることが言える。これより、シールド機の軌跡がヒューム管トンネルの線形に大きく影響していることがわかり、また、シールド機に後続するヒューム管群の追従性は良好であって、シールド機および先行ヒューム管の通った（形づくった）地山トンネルの中を、トンネルに沿い、徐々に地山トンネルを変形させながら、推進運動を行なっていることがわかる。このために、シールド機の上下左右への細かい酔歩は、後続ヒューム管群の繰返される微少な削りとり作用によって平滑化され、比較的スムーズなヒューム管トンネルが形成されることとなる。以上のように、シールド

実線 — : 推進前, 点線 ---- : 推進後

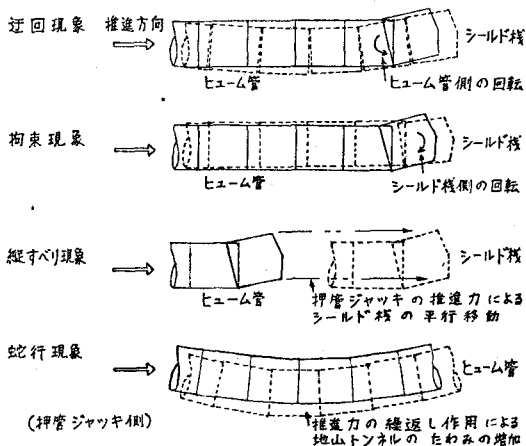
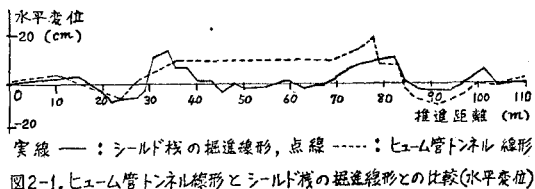


図1. ヒューム管推進運動により生じる特異現象の代表例



実線 — : シールド機の掘進線形, 点線 ---- : ヒューム管トンネル線形

図2-1. ヒューム管トンネル線形とシールド機の掘進線形との比較(水平変位)

機の軌跡は、ヒューム管トンネルの線形に直接影響するので、真直性の向上を図るためには、シールド機の姿勢角の急変は極力避けることが必要であり、またシールド機とこれに近接するヒューム管群の一体化した動きをつくり出すことが重要となる。

3. 蛇行によるトンネルの伸長特性

蛇行にもとづく諸特性の中、ヒューム管トンネルの中心線が伸長する伸長特性は、ヒューム管群のもつ微少なうねり曲りの影響を端的に反映した特異現象であって、図2の実例での伸長量はヒューム管とリングとの実長よりも約40cm長い値を示し、掘進距離計算の補正が必要となることがわかった。これは図3のように、No. $i-1$, i ヒューム管継手部の接触角 ϕ_i が零でなく、かつゆるみが存在するため、中心線が微少増加し、この累積された増加量がヒューム管自体の微少曲りによる減少量の総和よりも大となって、伸長が生じたものと推定される。この場合の伸長量 $\Delta(n)$ は、ヒューム管の推進本数 n の関数であって、実用範囲の n の値に対し、2次元的に(1)の近似式で示される。(1)式における ϕ_i の分布が正規分布 $N(m, \sigma^2)$ となっているものとする、(2)式が成立し、伸長量の期待値 $E[\Delta(n)]$ は(3)式で表わされる。通常のうねり曲りでは相関係数 r 、平均値 m 、分散 σ^2 が $|r|, m, \sigma^2 \ll 1$ であるので、(3)式より、 $E[\Delta(n)] > 0$ となり、伸長が生じることがわかる。

$$\Delta(n) = \frac{D}{2} \sum_{i=1}^n |\phi_i| - \frac{D}{2} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i \phi_j \right)^2 \quad \text{-----(1)} \quad D: \text{ヒューム管の外径}, \quad l: \text{ヒューム管の長さ}, \quad \Phi: \text{Gaussの誤差関数},$$

$$E(\phi_i) = m, \quad E(\phi_i^2) = \sigma^2 + m^2, \quad E(|\phi_i|) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma \exp\left(-\frac{m^2}{2\sigma^2}\right) + m \left[\Phi\left(\frac{m}{\sigma}\right) - \Phi\left(-\frac{m}{\sigma}\right) \right], \quad E(\phi_i \phi_j) = r \sigma^2 + m^2 \quad (E \text{ は } i \neq j), \quad \text{-----(2)}$$

$$E[\Delta(n)] = \frac{n \sigma D}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{m^2}{2\sigma^2}\right) + \frac{n m D}{2} \left[\Phi\left(\frac{m}{\sigma}\right) - \Phi\left(-\frac{m}{\sigma}\right) \right] - \frac{n(n+1) D}{12} \left[(2n+1)m^2 + [3+2(n-1)r]\sigma^2 \right] \quad \text{-----(3)}$$

4. 蛇行による推進力の伝達特性

蛇行にもとづくヒューム管群の微少なうねり曲りに影響される特質として、前述の伸長現象以外に、蛇行の程度による押管ジャッキの所要推進力の変動現象がある。これは、蛇行係数 λ_n に比例して、(4)式のように所要推進力が増加し、ヒューム管推進本数 n が大となると著しくなるものである。また比較的大きい接触角 ϕ_i が存在する場合には、その継手部における推進力の伝達状態は、円筒状端部の応力集中現象で論ぜられる。実際的には円筒相互の接触論的な考え方が適用できて、(5)式の関係が成立する。(5)式によると接触角に対応する最大推進力が定められる。

$$\left. \begin{aligned} P_n(\lambda_n) &= P_n(0) \cdot [1 + \lambda_n] \\ \lambda_n &= \mu \sum_{i=1}^n |\phi_i| \\ P_n(0) &= P_0 + nR \end{aligned} \right\} \quad \text{-----(4)} \quad \left. \begin{aligned} P_n(\lambda_n): &\text{蛇行係数が } \lambda_n \text{ の場合の所要推進力}, & [P_i(\lambda_i)]_{\max}^m: &\phi_i^m \text{ に対する最大推進力} \\ P_n(0): &\text{蛇行が全くない場合の所要推進力}, & [P_i(\lambda_i)]_{\max}: &\text{接触角 } \phi_i \text{ に対応する最大推進力} \\ P_0: &\text{シールド機の反力}, \mu: &\text{摩擦係数}, & m_1, m_2, K: \text{定数, 実験例によると} \\ R: &\text{ヒューム管1本当りの抵抗力}, & & m_1 \approx m_2 \approx 1, K \approx 350 \text{ となる} \end{aligned} \right\} \quad \text{-----(5)}$$

5. あとがき

以上の各特性への対策はいづれもシールド機の掘進特性を良好にして、トンネルの真直性を確保することがポイントである。現在検討中のシールド機の動特性の考察結果とあわせて、今後より深い研究を行なう予定である。

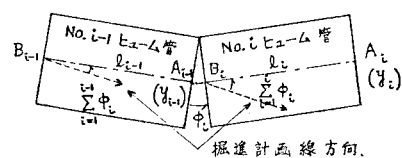
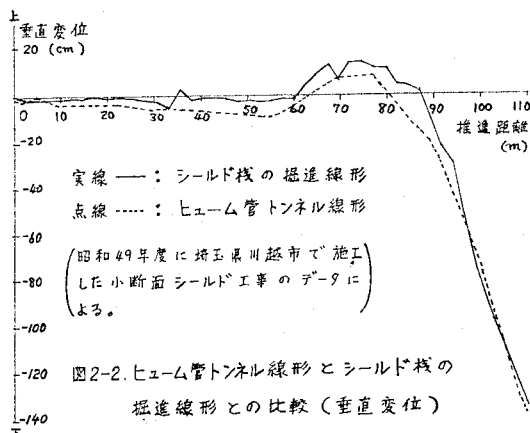


図3. ヒューム管相互の接触角 ϕ_i にもとづく中心線の変化