

日本電信電話公社 茨城電気通信研究所 正員の野村由司考

正員 保科 宏

梅津 孝雄

1. まえがき 近年、シールド工法や推進工法においては、曲線施工が重要な課題となってきた。この曲線施工を達成するためには、①方向修正機能をもつこと、②姿勢角・位置が計測できること、③方向制御方法が確立されていること、が必要である。土中推進体においては、この方向修正性能と姿勢角・位置計測に不確定性を避けることができないが、不確定性下での方向制御方法は未検討の状態である。本報告は、安全率・余裕度法により、この不確定性を検討したものであり、①シミュレーションにより、推進体の方向修正性能の不確定性の範囲をモデル化し、②偏角を横軸に、偏位を縦軸として軌跡をプロットした偏角-偏位線図によって軌跡の予測を可能とし、③偏角と偏位のしきい値による方向制御方法と、④計測精度、方向修正性能、施工精度を考えた方向制御の評価法に対する基本的な考え方を明らかにしたものである。

2. 方向修正性能の不確定性のモデル化 一推進毎に方向修正をする推進体の方向修正性能に不確定性がある場合、姿勢角変化量の平均値を θ 、バラツキ成分を δ とすれば、 δ のみに着目してシミュレーションを行えば、不確定性の範囲を求めることができる。最も悪い条件の一様分布、 $|\delta|_{\text{maximum}} = 0.1^\circ$ なる δ に対するシミュレーションの結果を図1に示し、一例として40推進後の偏角と偏位の度数分布を図2に示す。そして、推進数 N と、偏角の標準偏差 σ_θ 、偏位の標準偏差 σ_y との関係を図3、および式(1)、式(2)に示す。 $\sigma_\theta = 0.5515 \max|\delta| N^{0.518} [^\circ] \dots (1)$ $\sigma_y = 0.00693 |\delta|_{\text{maximum}} N^{1.54} \dots (2)$ 式(1)から、不確定性が一様分布であっても、一定の広がりをもつ不確定量を N 回加えて得られる不確定量の広がりには N 倍にはならず、ほぼ $\sqrt{N}$ 倍になるという重要な関係が明らかになる。

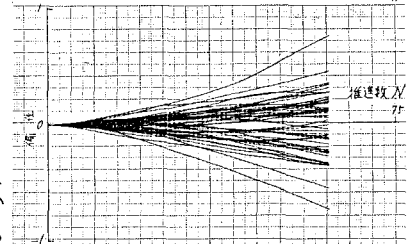


図1. 推進 シミュレーションの結果

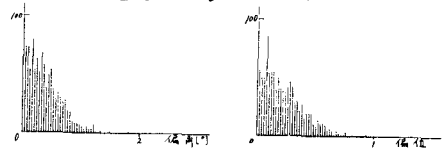


図2. 40回推進後の偏角と偏位の度数分布

3. 軌跡の予測、および方向制御方法

3.1 計測と方向修正性能に不確定性がない場合 図4に示すように、水平面上で右回り曲率半径 R の計画線に対して、偏角 $\Delta\theta$ 、偏位 ΔR_0 から、一推進毎に(推進距離: l) θ ずつ方向修正する場合、 N 推進後の $\Delta\theta_N$ 、 ΔR_N は式(3)、式(4)によって表わされる。

$$\Delta R_N = \sqrt{\sum_{i=1}^N l^2 \cos^2(\Delta\theta_0 + (i-1)\theta)^2 + \left[\sum_{i=1}^N l \cdot \sin[\Delta\theta_0 + (i-1)\theta] \right]^2} \quad (3)$$

$$\Delta\theta_N = \Delta\theta_0 + N \cdot \theta - N \cdot l / R \quad (4)$$

$R=200$ [m], $l=45$ [cm], $\theta=0.5^\circ$ の場合に例をとして説明する。(次節以下についても、この条件を用いる。) 計画線の右側(左側)20 [cm] の地点で計画線に平行になる場合の軌跡を式(3)、式(4)から求めたものが図5の $\widehat{AB}$ ($\widehat{CD}$) である。さらに、計画線に沿わせる時の軌跡は、 $\widehat{AB}$ ($\widehat{CD}$) を上(下)に平行移動させて $\widehat{IO}$ ($\widehat{JO}$) を得る。図5に示す各曲線の意味から、計画線 ± 20 [cm] の施工精度とするには、 $\widehat{AB}$ ($\widehat{CD}$) に計測値がくるまでは無修正とし、 $\widehat{AB}$ ($\widehat{CD}$) に計測値

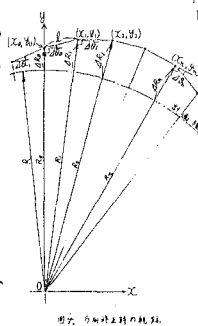


図4. 方向修正時の軌跡

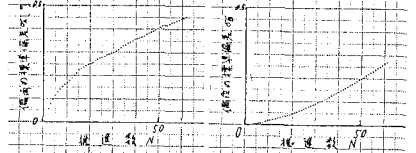


図5. 偏角と偏位の標準偏差

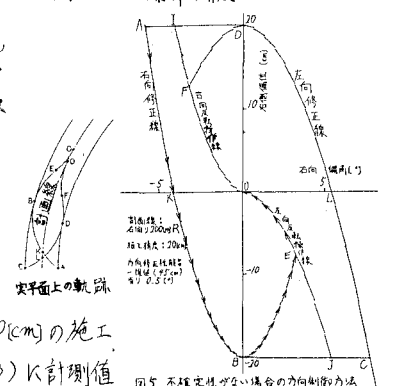


図6. 不確定性がない場合の方向制御方法

がきか時から連続して右向(左向)修正を行ない、E点(F点)まできか時に反転操作、すなわち左向(右向)修正を行なって計画線に沿わせるという、方向制御方法の基本的な考え方が明らかになる。

3.2 計測に不確実性がある場合 姿勢角と位置の計測の不確定量が一定の範囲内に限定される場合、ここでは姿勢角の誤差が $\pm 0.5^\circ$ 、位置の誤差が $\pm 2\text{cm}$ 、すなわち図6においてマシンがO点にあっても $\square PSQR$ 内に限定される場合に例をとって説明する。図6にて、 $\widehat{D'C'}$ 、 $\widehat{I'R'J'}$ 、 $\widehat{I'S'J'}$ 、 $\widehat{A'B'}$ は、マシンが $\widehat{DC}$ 、 $\widehat{IOJ}$ 、 $\widehat{AB}$ 上にある場合の計測値の不確実性の範囲を示したものである。よって、計測値が初めて $\widehat{A'B'}$ ($\widehat{CD}$)にきた時に右向(左向)修正を行ない、 $\widehat{J'IO}$ 、 $\widehat{R'J'}$ にきてから左向(右向)反転修正を始めて、誤差範囲 $\square PSQR$ 内で計画線に沿わせるという方向制御方法が考えられる。

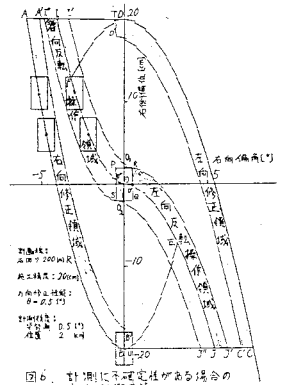


図6. 計測に不確実性がある場合の方向制御方法

3.3 方向修正性能に不確実性がある場合 N 回の推進後の不確実性による偏角は、約99%の確率で式(1) (一様分布の場合) から得られる 3σ 以内と考えられるので、 N 回の方向修正による姿勢角の変化量は最悪でも $N \cdot \sigma - 3 \cdot \sigma$ により与えられる。このことから、 N 回の修正 ($\sigma = 0.5^\circ$ 、 $\beta = 0.5^\circ$ 、一様分布) により、最悪でも計画線の左側 20cm の施工精度が得られるような初期値 X_N の集合 $\widehat{AB}$ を得る(図7参照)。よって、図8に示すように $\widehat{AB}$ ($\widehat{CD}$)までは無修正とし、 $\widehat{AB}$ ($\widehat{CD}$)から右向修正を行ない、 $\widehat{OJ}$ ($\widehat{OI}$)にきた時から左向(右向)反転修正を行なって計画線に沿わせるという方向制御方法が考えられる。

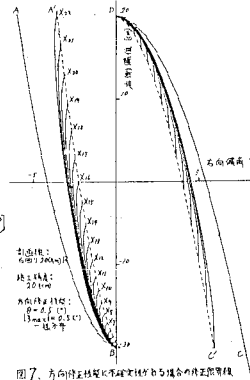


図7. 方向修正性能に不確実性がある場合の修正限界線

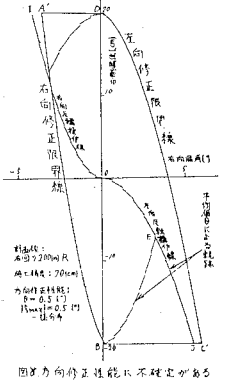


図8. 方向修正性能に不確実性がある場合の方向制御方法

3.4 計測と方向修正性能に不確実性がある場合 この場合は、実用的には最も重要であるが、3.2節の結果(図6)と3.3節の結果(図7)を考えた場合、すなわち、図8の $\widehat{AB}$ 、 $\widehat{IOJ}$ 、 $\widehat{CD}$ について、3.2節と同様の作図を行なって図9を得る。方向制御方法は、3.2節の $\widehat{AB}$ ($\widehat{CD}$)を $\widehat{AB'}$ ($\widehat{CD'}$)に置き換えることによって得られる。

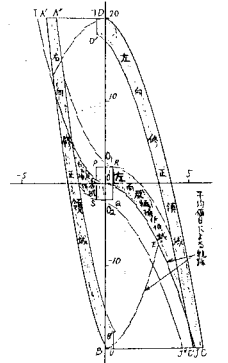


図9. 計測と方向修正性能に不確実性がある場合の方向制御方法

4. 方向制御の評価法 計測精度、方向修正性能、施工精度は、方向制御の三要素である。このうちの二要素が確定していれば、残る1要素を評価することができる。まず、計測精度と方向修正性能から施工精度を決める方法を示す。図10にて、計測誤差範囲 $\square PSQR$ 外に計測値がきた時に、修正操作を行なえるが、この場合マシンは $\square PS'Q'R'$ 内に存在する。この中で最悪の場合はS'点であり、ここから修正を行なった時のO'点が施工精度を与える。次に、方向修正性能と施工精度から計測精度を決める方法を示す。上述のS'点が 20cm の施工精度を得るための修正限界線 $\widehat{AB}$ 上にくる時の計測精度として、図11に示すように、種々の $\square PSQR$ を求めることができる。

5. おわりに ここに述べた中で、方向修正性能の不確実性については、土の種類・強度により、多様であることが大きな問題として残る。今後は、現在行なっている推進実験は、ここに述べた方向制御方法の裏付けをするとともに、方向修正性能の不確実性の多様性の克服を計りたい。

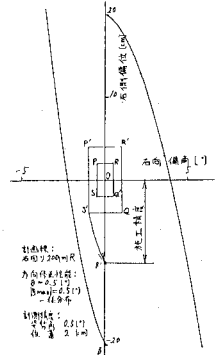


図10. 施工精度の計測法

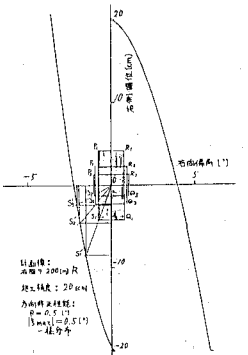


図11. 計測精度の評価法