

# 解説 きほんのき

## 方向制御・曲線施工の基本



やすだ たかし  
安田 卓司

機動建設工業(株)  
土木本部長

### 1 はじめに

推進計画ラインに対する方向修正も曲線造成のための方向制御も、掘進機に装備されている方向制御ジャッキのストローク差によって直線、あるいは計画曲線上に掘進機をのせるということに変わりありません。

計画ラインに対する方向修正は、基本的にジャッキストローク差が0の状態では直線を維持することが理想的ですが、

地山の特性や様々な要因によって掘進機が計画ラインを外れようとするのを防止しながら直線を維持するのが現実の状況です。

これに対して曲線施工は、計画曲線上に掘進機を乗せるためにジャッキストローク差を事前に計算で求め、算定値をもとに掘進機を操作することになります。施工に当たっては、これに直線施工時と同様に方向修正の操作を加えて計画曲線を維持することが必要になる

ため、より高度な技術が求められます。

方向制御で重要なのは、できるだけ早期に地山や掘進機の特性を把握して、ジャッキストローク差の量と操作開始の時期およびその後の掘進機の挙動を予測しておくことです。

以下に方向修正を含めた曲線施工について述べることにします。

### 2 曲線の造成

#### 2.1 曲線造成方法

曲線の造成方法は前述したとおり、掘進機に装備されている方向制御ジャッキにストローク差を設けることによって行いますが、一般的に掘進機を所定の曲線軌道に乗せるためには、方向制御ジャッキのストローク差を計算値より若干大きくします。そしてこの操作によってストローク差と測量結果を対比して掘進機の曲線造成能力や地山の特性等を把握します。

また、ジャイロコンパスを使用している場合は、施工延長に対するジャイロ角の変化量を事前に計算していた数値と対比してリアルタイムに掘進機の挙動を確認します。曲線造成の開始時点ではできるだけ測量頻度を多くして、計画



写真-1 曲線推進施工例

時に設定した制御量を見直して、地山に応じた最適な制御量を把握することが重要です

### 2.2 掘進機の最大折れ角の検討

掘進機の曲線造成能力は、曲線半径、掘進機の長さおよび掘進機の外径により算定された設計折れ角と、掘進機の方方向制御ジャッキの折れ曲げ能力（最大折れ角）により検討します。掘進機的设计上の折れ曲げ量（必要折れ角）は、図-1に示すように掘進機前胴部先端面中心、中折れ箇所中心および後胴部後端面中心が、所定の曲線軌道上有ると仮定して式-1で算定します。

$$\theta_0 = \sin^{-1} \left\{ \frac{L_F/2}{R} \right\} + \sin^{-1} \left\{ \frac{L_R/2}{R} \right\} \dots \dots \dots (式-1)$$

ここに、

- $\theta_0$  : 掘進機的设计折れ角 (度)
- $L_F$  : 掘進機前胴部先端面中心から中折れ箇所中心までの長さ (m) (算定上の中折れ箇所は掘進機前胴部後端面中心とする)
- $L_R$  : 中折れ箇所中心から掘進機後胴部後端面中心までの長さ (m)
- R : 曲線半径 (m)

### 2.3 掘進機の最大折れ角の算定

掘進機を最大限に曲げることのできる最大折れ角 ( $\theta_{max}$ ) は、方向制御ジャッキのストロークと方向制御ジャッキの取付け間隔により規定され、次式により求めます。

$$\theta_{max} = \sin^{-1} \left( \frac{S}{d} \right) \dots \dots \dots (式-2)$$

ここに、

- $\theta_{max}$  : 掘進機的设计折れ角 (度)
- S : 方向制御ジャッキのストローク差 (m)
- d : 方向制御ジャッキの取付け間隔 (m)

実際の曲線施工においては、計画ラインに対する方向制御および掘進機外側の地山反力の状況により、掘進機前

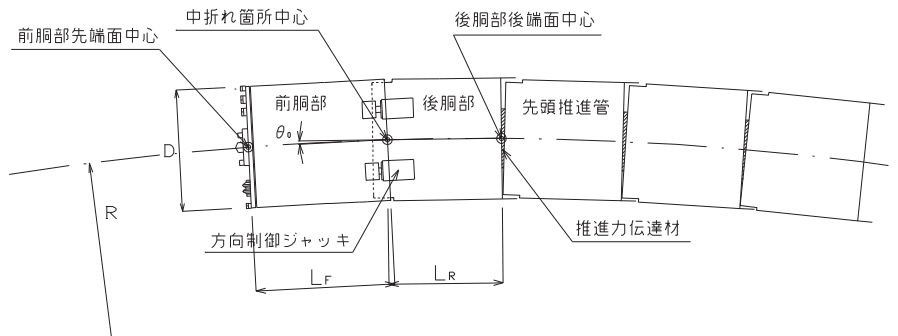


図-1 掘進機的设计折れ角

胴部・後胴部間の折れ曲げ量の増減が必要となるため、経験的に、掘進機の折れ曲げ能力（最大折れ角）は、設計折れ角の1.5倍以上の余裕を持たせるべきです。

$$\theta_{max} \geq 1.5 \cdot \theta_0$$

また、曲線施工条件が厳しい場合は掘進機の中折れ箇所を2箇所以上設けることや曲線造成補助筒の採用を検討する必要があります。

以上の通り、曲線推進は掘進機を折り曲げ、外側地盤の反力により曲線を造成しようとするものですが、地盤の反力が期待できない軟弱層においては、地盤反力を確保するために地盤改良やガイド杭の打設が必要となる場合があります。

### 3 後続管列の追従と推進力伝達材

曲線施工において、掘進機は正確に曲線ラインを造成したにもかかわらず、後続の推進管が計画ラインを正確にトレースできなかったり、管の折れ曲がり量が集中したりすることにより、目地の抜け出しや管端面接触による推進管の破損が生じることがあります。

これらを防止するには次に述べる対策を講じて、管列の最終的な出来形が設計ラインに乗るように注意する必要があります。

### 3.1 推進管目地の開口長

曲線部では図-2に示すように推進管継手部の目地が開きます。鋼製カラーに覆われている継手には許容開口長（抜け出し長）が定められており、開口長さが許容値を超えると継手の止水性能が損なわれます。したがって、開口長の制約により曲線の最小半径が定まります。開口長、開口差および曲線半径との関係は次式のとおりです。

$$S_1 = S_d + S_4$$

ここに、

- $S_1$  : 曲線部外側目地の開口長
- $S_d$  : 曲線部外側、内側目地の開口差
- $S_4$  : 曲線部内側目地の開口長

$$S_d = \frac{\ell \cdot D_0}{\left\{ R - \frac{D_0}{2} \right\}} \dots \dots \dots (式-3)$$

- $\ell$  : 管長
- $D_0$  : 管外径
- R : 曲線半径

なお、 $S_4$ は管端部が直接接触して応力が集中することを防止するため推進力伝達材を挿入しますが、施工時の安全性を考慮して計画当初から推進力が最大になっても5mm以上となるように設定する必要があります。

- R : 曲線半径 (m)
- D : 管外径 (m)
- $\ell$  : 管長 (m)
- T : 管厚 (m)
- $\alpha$  : 折れ角 (度)

$$S_1 = \frac{\ell \cdot D_0}{\{R - \frac{D_0}{2}\}} + S_4 \quad \dots (式-4)$$

$$S_2 = \frac{\ell (D_0 - T)}{\{R - \frac{D_0}{2}\}} + S_4 \quad \dots (式-5)$$

$$S_3 = \frac{\ell \cdot T}{\{R - \frac{D_0}{2}\}} + S_4 \quad \dots (式-6)$$

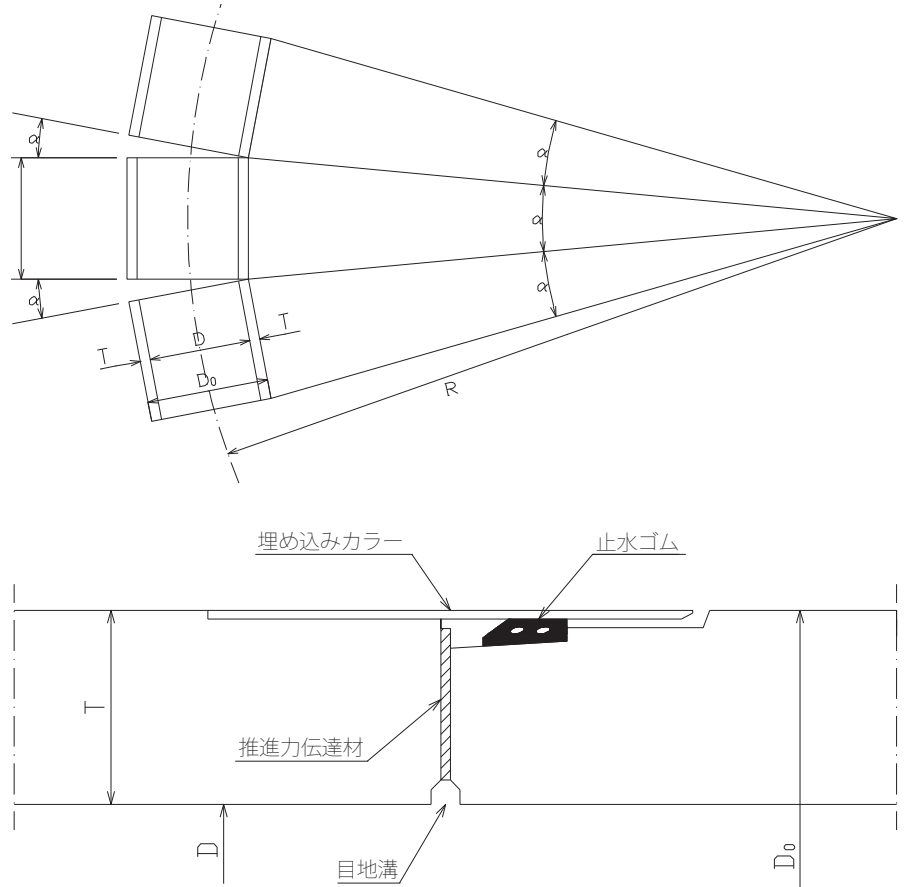
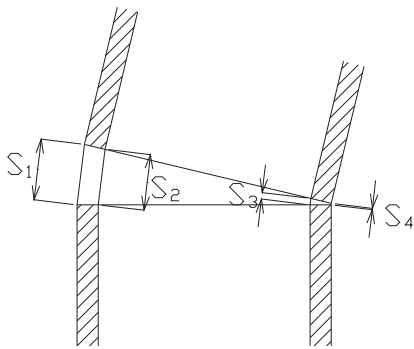


図-2 曲線推進に伴う曲線・開口長説明図

### 3.2 目地開口長の保持

管列を計画した曲線に沿って推進するためには管継手部の目地開口長をほぼ計画値に保つ必要があります。曲線施工区間には推進力伝達材を挿入して推進力を広い範囲に均等に負荷できる構造とします。

しかし、継手部の開口長が計画通りにならなかった場合、管列の乱れだけでなく、管の耐荷力を越える集中荷重

が生じて管に損傷を与えたり、逆に広がりすぎて管の許容開口長を超えて管内に滑材や地下水だけでなく土砂が流入して推進不能となる可能性があります。

これらのトラブルを防止し、所定の目地開口長を保持するために、現在では写真-2、3のような目地開口制限装置

を使用して曲線外側の目地を計画量以上に広がらないような工夫をするケースが増えています。

### 3.3 推進管端部における推進力伝達方法の検討

曲線区間では推進管が連続した折れ線状態となって曲線を形成しているため、推進管は曲線の内側でポイントタッチ（点接触）する状態となり、非常に小さな面積で推進力を伝達することになります。この状態では管の一点に応力が集中するため管が破損しやすくなります。

この対策として推進力伝達材を挿入する方法があり、推進力や曲線半径に応じて形状や厚さ、硬さ等を検討した上で使用します。推進力伝達材は曲線区間および曲線区間を通過する推進管の継手部に図-3のように左右を空隙と



写真-2 推進管材にあらかじめ目地開口制限装置全体を組み込んで管を製作する方法管内に突出しないので安全・確実な方法といえる



写真-3 推進管材にアンカを取付けて目地開口制限装置を組み立てる方法後施工アンカでも可能だが管材保護の面からはインサートアンカが望ましい

して上下に挿入することを基本とし、推進力伝達材の塑性変形を利用して推進力を管の上下に分散します。推進力伝達材は、歪みが大きくなると塑性変形を示す物が適しています。

推進力伝達材の面積は通常、推進管端面部の1/2程度としますが、上下と左右の厚さや硬さを変えて全面に挿入する場合があります。

#### 4 おわりに

近年の推進工事では長距離化と急曲線の採用、曲線施工でも平面だけでなく、縦断曲線や両方を合成した三次元曲線の施工を求められることも増えてきています。この様な環境下で発注者から求められる製品を高品質で提供するには、高度な技術を研究し、身につけて高い技術力を持って施工することが必要になります。

ただし、どれ程の高い技術やシステムがあったとしても、高度な機器やシステムに頼り切ることには、危険性を含んでいることを認識しておかなければなりません。すなわち、機器が提示する数値を鵜呑みにすることによって、小さなトラブルが取り返しのつかない状況まで進行することもあり得るのです。技術やシステムの原理・長所とともに短所についても理解した上で、それらを使いこなすことと同様に、今一度基本に立ち返ることも重要なことであると思います。そして、それがまた新しい技術を生み出して、より高度な技術に結びつくことを願ってやみません。

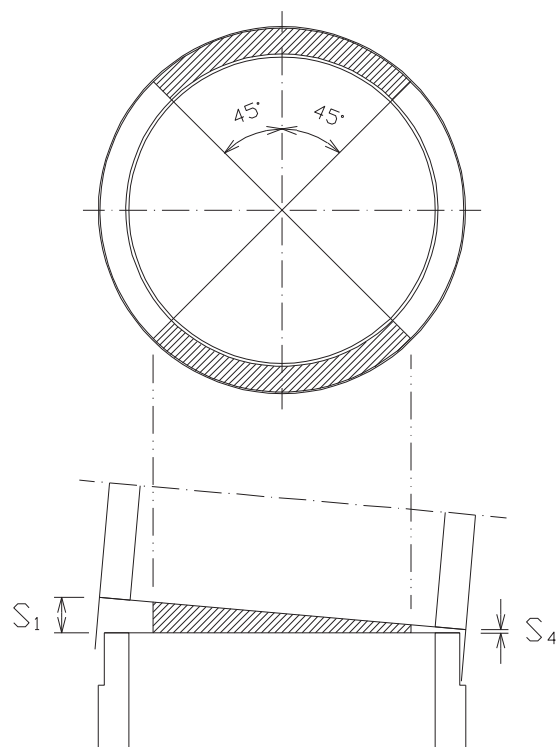


図-3 曲線区間中の推進力伝達材