

VI-262

最小自乗法を用いたシールド機とセグメントとの相対位置関係の測定

榎大本組 中西祐啓 榎大林組 市川直義 片山哲明
東亜建設工業(株) 内藤正三 大末建設(株) 丹下 豊

1. はじめに

シールドトンネルの掘削・構築を行う場合、セグメント全体の線形の管理と共に、これから掘削する方向の管理、セグメントの断面変形の管理も必要となってくる。一般にシールドトンネルの曲線施工では、シールド機は組み立てられたセグメントとある角度を保持しながら掘進することになる。この角度の管理が、シールドトンネルの施工精度に大きく影響してくる。従来、シールド機とセグメントとの間の角度差を知るために推進ジャッキの伸び量を測定していた。しかしながら、シールド機の中心軸とセグメントの中心軸のズレを知ることはできない。自動測量への移行、セグメントの形状変化の測定等を併せて考えると、シールド機からセグメントの断面を測定する方法も有効になってくると考えられる。

測距を行う場合、短距離であれば反射用プリズムを使用しなくても測定できる光波測距儀が市販されている。この測距儀は、ある平面上で任意の角度での測距が可能である。シールド機にこの測距儀を設置し、中心軸に直角な方向にセグメントの断面を測定すると、その形状は楕円形を示すはずである。すでに平面上に存在する楕円形の式を導き、その楕円形を得るために最低限必要な測点数、パラメーター値の求め方について示した。また、測定時の測距誤差を考慮した数値シミュレーションを行い、測定値からパラメーターを求めたときの精度について調査した。(参考文献1))

本報告では、必要な数だけの測点数だけではなく、可能な限り多くの測点の測定結果に対して最小自乗法を適用して楕円形のパラメーターの値を推定する方法を示す。さらに、種々の測点数に対する数値シミュレーションを行い、測点数によってパラメーターの値のバラツキ(精度)がどのように変化するかを調査する。

2. シールド機から見たセグメント形状

セグメントが変形せず、シールド機とある角度 θ を持っている場合には、次式で表される。

$$\frac{\{(y-b)\sin\phi+(x-a)\cos\phi\}^2}{(cr)^2} + \frac{\{(y-b)\cos\phi-(x-a)\sin\phi\}^2}{r^2} = 1 \quad (1)$$

ここに、 r :セグメントの半径、 $c:1/\cos\theta$ 、 a, b :楕円中点の測定原点からのズレ、 ϕ :セグメントの回転角である(図-1)。式(1)は5個のパラメーターを持っているので、最低限5点を測定しなければならないことがわかる。(参考文献1))

一般にシールドトンネルは一定の縦断勾配で設計され、曲線は水平方向のみであることを考えると $\phi=0^\circ$ と考えてもよい。また、セグメントを多数測定した場合に、 a, b はそれぞれ測定値の x 方向、 y 方向成分の平均値と考えられる。これらにより、実際の測定値をセグメント中央からの測定値(方向角 α 、距離 l)に変更すれば次式となる。(図-2)

$$\frac{l^2 \cos^2 \alpha}{(cr)^2} + \frac{l^2 \sin^2 \alpha}{r^2} = 1 \quad (2)$$

ここで、 $L=1/l^2$ 、 $S=(1-c^2)/(cr)^2$ 、 $R=1/r^2$ とすれば、式(2)は次式で表される。

$$L = S \cos^2 \alpha + R \quad (3)$$

$\sum (L_i - L)^2 \rightarrow \min$ となる(最小自乗法)ようにパラメーター値を求める。各パラメーター値を求めるための手順は以下の通りとなる。

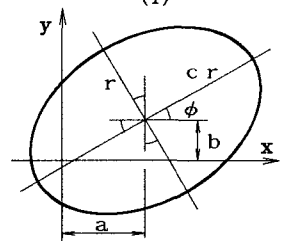


図-1 シールド機から見たセグメントの一般形状

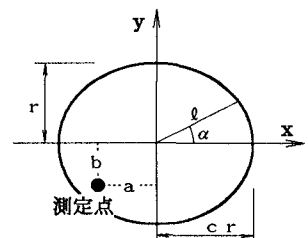


図-2 式(2)の形状

- ① a, bの値を求める。（測定値のx方向成分, y方向成分の平均値を求める）
- ② 測定点からの測定値をセグメント中央（a, b）からの測角・測距資料に変更する。
- ③ 加工した資料をもとに、式(3)に最小自乗法を適用してc, rの値を求める。

3. セグメント断面測定シミュレーション

セグメントの断面形状を測定した場合に、どの程度の誤差が生ずるのかを数値シミュレーション手法²⁾を用いて先に調査する。これにより、必要とする情報が必要な精度で得られるかどうかを知ることができる。

前述の光波測距儀の測距精度は、標準偏差で5mm程度と言われている。測定原点から測点までの真の距離を平均値とし、標準偏差5mmとなるような正規乱数を模擬発生させる²⁾。これを測定された距離として座標値を求め、これらの測定値からパラメーターの値を逆算する。真のパラメーター値との差を求める。

シールド機の中心軸とセグメントの中心軸の角度差 θ が 0° , 5° , 10° の場合、測点数を6～72カ所とした場合の断面測定シミュレーションを行った。参考文献1)と比較するために、セグメント直径を $D = 9\text{ m}$ と仮定した。シミュレーション結果を表-1に示す。また、表-2に参考文献1)の結果を示す。シミュレーション結果から次のようなことが読み取れる。

- ① 予想される結果であるが、測点数が多いほど精度が良くなる。
- ② すべてのパラメーターの測定精度はシールド機とセグメントとの角度差 θ には影響されない。
（表-2では θ が大きくなるほどr, cの精度が悪くなっている）
- ③ 表-2と比較すると、a, bの精度は本報告（6測点の場合）の方が2倍程度良くなっている。
- ④ r, cの精度についてはどちらも同程度である。

表-1 測点数を変えた場合のセグメント断面測定精度（標準偏差）

測定間隔 (測点数)	60° (6カ所)			45° (8カ所)			30° (12カ所)			20° (18カ所)			15° (24カ所)			10° (36カ所)			5° (72カ所)		
	θ	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	5°	10°	0°	5°
a (mm)	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4
b (mm)	1.4	1.4	1.4	1.2	1.2	1.2	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4
r (mm)	3.4	3.4	3.4	3.0	3.0	3.0	2.4	2.4	2.4	2.0	2.0	2.0	1.8	1.7	1.7	1.4	1.4	1.4	1.0	1.0	1.0
c (×10 ⁻³)	1.3	1.3	1.3	1.1	1.1	1.1	0.9	0.9	0.9	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4

本検討では、a, bの値を求めるためにx方向, y方向成分の単純平均とし、かなり良い精度となることが得られたが、これはセグメント全体を万遍なく（均一に）測定できることを前提としている。実際のシールド機内は、機材等が多く存在しており、このような理想的な測定は不可能な場合が多く偏った測定となる。このような偏った測定となった場合の対処方法についても検討しておく必要がある。また、ここではシールド機とセグメントとの角度のズレは水平方向のみであると仮定したが、シールド機のローリング・ピッチング、組み立てたセグメントの縦断勾配の変化等により実際には垂直方向にも傾きが現れる可能性がある。したがって、 ϕ の値を求める方法についても検討する必要があると考えられる。

4. おわりに

セグメントを6カ所以上測定した場合に得られるパラメーター値の精度について検討を行った。この手法を用いれば、セグメントの真円度の測定や、断面変形の測定等に対しても利用可能であると考えられる。本検討ではセグメント径9mの大口径を対象としたが、実際に利用する場合には対象となるセグメント径に対する測定精度を事前に調査しておくことが必要である。

【参考文献】

- 1) 中西・木村・高岡：セグメント断面計測によるシールド機との相対位置関係の測定，年講，1991.9.
- 2) 木村・中西・上森：数値シミュレーションによる測量精度推定の提案，年講，1991.9.

表-2 5測点の場合の精度
（参考文献1)より抜粋）

測定間隔 (測点数)	72° (5カ所)		
θ	0°	5°	10°
a (mm)	3.1	3.1	3.1
b (mm)	3.1	3.1	3.1
r (mm)	3.3	4.0	4.1
c ($\times 10^{-3}$)	1.0	1.5	1.6