

III-59 急曲線施工用鋼製セグメントの試算

東洋大 学生員 深井直光・山越重志
 東洋大 正員 小泉 淳
 早稲田大 正員 村上 博智

1. はじめに

シールドトンネルはそのほとんどが道路下に構築されており、下水道、電力、通信などの中小口径のトンネルでは、道路の交差点において直角あるいはさらに鋭角にカーブを切らなければならないケースが数多く見られる。このような場合、シールドジャッキを極端に偏心させて急曲線部の施工を行うわけであるが、この偏心力によってセグメントには大きな応力が発生する。

本研究は、特別な補助工法なしで急曲線施工を行う際に、リング継手断面に発生する応力を検討し、急曲線施工用鋼製セグメントの設計試算を行ったものである。

2. 検討の概要

(I) 解析モデル

直線区間に接続する急曲線区間のシールドトンネルは、その中心線を折れ線で表示して図1に示す棒構造モデルに評価した。図中、先端に近い区間は裏込めがまだ硬化していないため地山からの反力が期待できないと考えられる区間である。今回の試算では、下水道などでの実績をもとにこの区間を6リングに設定した。

(II) 荷重

本研究では、シールドマシンに装備されている推進用ジャッキのうち片側のジャッキのみを最大推力で作用させるものと考え、図1に示す軸力と偏心曲げモーメントを算出した。また一般に推力の作用方向はシールド内のクリアランスとセグメントとの幾何学的条件により、トンネル軸線から2~3°傾くとされている。計算にあたってはこの作用方向を3°と仮定した。

(III) 試算ケース

試算は、7種類のセグメント幅に対して表1に示したセグメント外径、曲率半径、地盤条件を組み合わせ、合計189ケースについて行った。

試算の条件として、セグメントリングの先端のラジアル方向の変位がシールド内のクリアランスを侵さないようにしている。このクリアランスは、テールシールの厚さや余堀量などを考えて、本研究では5cmに設定した。

また、主桁などの板厚はセグメントの製作上の制約を考慮して40mm以下とした。表2は設計に用いた許容応力度の表である。一時的荷重であることを考えて、許容応力度は降伏点に設定している。継手の許容開口量は、防水上の観点から1mmに設定した。

3. 試算結果とその考察

図2は得られた曲げモーメント図の一例である。最大曲げモーメントは地盤反力が期待できるとした位置から数リング目に発生しており、地盤が悪いほど先端から遠くで最大値が発生していることがわかる。

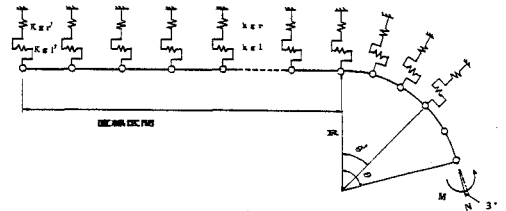


図1 急曲線施工されたシールドトンネルの解析モデル

表1 試算ケース

| Ds (m) | 3150 | 4550 | 6000 |
|--------------------------|------------------------------------|------------|------------|
| R (m) | 20, 30, 40 | 30, 40, 50 | 40, 50, 60 |
| k (kgf/cm ²) | 0.25, 1.0, 2.0 | | |
| Nst (リング) | 20 | | |
| Nc (リング) | 30 | | |
| Bst (m) | 1000 | | |
| Bc (m) | 250, 300, 450, 500, 750, 900, 1000 | | |

Ds: リング外径 R: 曲率半径 k: 地盤反力係数 Nst, Nc: 直線および曲線区間のリング数 Bst, Bc: 直線および曲線区間のリング幅

表2 一時的荷重に対する許容応力度

| 材質 | 鋼板 | | アルミ | |
|-----|------|------|------|------|
| | SS41 | SM50 | 8・8 | 10・9 |
| 圧縮 | 2400 | 3200 | — | — |
| 引張 | 2400 | 3200 | 6400 | 9000 |
| せん断 | — | — | 3700 | 5200 |

単位: kgf/cm²

表3~表5は、正の最大曲げモーメントが発生する位置でのリング継手部の応力度、継手の開口量およびセグメントリング先端の変位量をまとめたもので外径4550mmの例である。表3はセグメント幅1000mmの場合であるが、ほとんどのケースで主桁の厚さを40mmにしても変位を許容以内に抑えることが出来ず、また継手の開口量はカーブのきついケースで許容値を越えており、防水上の観点からも再検討が必要となる。表4は幅500mmの場合であり、全てのケースで応力度は許容以内に収まっているが、地盤が悪い場合には主桁の厚さを40mmにしても変位の方が許容値を越えている。一方、継手の開口量は1mmを越えているものはなかった。表5は幅250mmの場合である。幅500mmに比べて主桁の板厚の低減がみられるが、500mmの場合と同様に、地盤が悪い場合には主桁の厚さを40mmにしても変位を許容以下に抑えることはできなかった。なお外径3150mmあるいは6000mmについても同様な結果が得られており、急曲線施工では、曲線を切るための幾何学的制約に加え、発生する応力度や変形量の面からも、セグメント幅を小さくする方が有利であることがわかる。

次に、セグメントリングがシールドマシンから出てすぐに地盤の反力が期待できる場合、すなわち瞬結性の裏込め材を用いて同時裏込め注入を行う場合などであるが、これについて検討を行った。表6は外径4550mm、セグメント幅500mmの場合の結果であり、これを見ると、 $R=30m$, $k=0.25$ kgf/cm^3 の時には板厚を最大の40mmにしても、変位が許容値を越えてしまい、さらに地盤改良などの付加的な対策が必要となることがわかる。しかし、このケースを含めて同時裏込めを行わない場合の表4と比べてみると、同時裏込めを行った場合の方が、明らかに応力・変位の低減が認められ、瞬結性の裏込め注入剤を用いた同時裏込め注入などが急曲線施工には非常に有効であることがわかる。

4. おわりに

従来から一般的に行われているような補助工法を用いた急曲線施工も一つの方法であるが、ここに示したように、セグメントの主桁板厚やボルトの強度区分・径などを変えた急曲線施工用の高強度セグメントを使う方法も有効である。いずれの方法を選ぶかは、それぞれの経済性を検討した上のことになるだろうが、補助工法を可能な限り用いずに計画線通りの施工をする方が、シールド工法の本来の姿であると思われる。

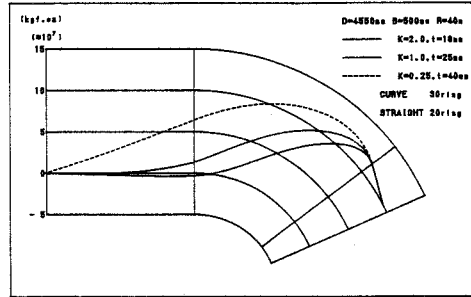


図2 曲げモーメント図

表3 各応力度・変形量及び変位量 (D₀ = 4550mm, B = 1000mm)

| 曲率半径 R (m) | 継手セグメントの支持間隔 t (mm) | 継手上面の支持間隔 t (mm) | 地盤反力係数 k (kgf/cm ³) | 継手に生ずる圧縮応力度* (kgf/cm ²) | 主桁に生ずる引張応力度* (kgf/cm ²) | ボルトに生ずる引張応力度* (kgf/cm ²) | ボルトに生ずるせん断応力度* (kgf/cm ²) | 開口量 (mm) | リング先端の変位量 (mm) |
|------------|---------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------|----------------|
| 30 | 1.6 | 4.0 | 0.25 | 2351.32 | 2345.53 | 5166.23 | 342.35 | 3.23 | 12.14 |
| | | 4.0 | 1.0 | 2229.18 | 1988.45 | 4379.75 | 260.00 | 2.04 | 6.32 |
| | | 3.2 | 2.0 | 2156.63 | 2502.75 | 3528.02 | 842.60 | 0.92 | 5.00 |
| 40 | 1.6 | 4.0 | 0.25 | 2175.83 | 1842.14 | 4057.48 | 195.49 | 0.97 | 10.33 |
| | | 4.0 | 1.0 | 2051.20 | 1558.42 | 3432.57 | 113.12 | 0.82 | 6.77 |
| | | 2.8 | 2.0 | 1995.33 | 2587.92 | 2793.06 | 604.63 | 0.84 | 4.87 |
| 50 | 1.6 | 4.0 | 0.25 | 2044.55 | 1519.61 | 3347.07 | 96.62 | 0.80 | 10.30 |
| | | 4.0 | 1.0 | 1923.28 | 1284.54 | 2829.31 | 25.98 | 0.77 | 4.82 |
| | | 2.5 | 2.0 | 1880.59 | 2695.09 | 2318.82 | 446.54 | 0.83 | 4.96 |

表4 各応力度・変形量及び変位量 (D₀ = 4550mm, B = 500mm)

| 曲率半径 R (m) | 継手セグメントの支持間隔 t (mm) | 継手上面の支持間隔 t (mm) | 地盤反力係数 k (kgf/cm ³) | 継手に生ずる圧縮応力度* (kgf/cm ²) | 主桁に生ずる引張応力度* (kgf/cm ²) | ボルトに生ずる引張応力度* (kgf/cm ²) | ボルトに生ずるせん断応力度* (kgf/cm ²) | 開口量 (mm) | リング先端の変位量 (mm) |
|------------|---------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------|----------------|
| 30 | 1.6 | 4.0 | 0.25 | 1693.20 | 942.27 | 2075.44 | 91.69 | 0.49 | 3.46 |
| | | 2.5 | 1.0 | 1574.59 | 1568.75 | 1349.73 | 262.81 | 0.48 | 4.98 |
| | | 2.0 | 2.0 | 1538.40 | 1951.11 | 1074.37 | 539.42 | 0.61 | 4.54 |
| 40 | 1.6 | 4.0 | 0.25 | 1602.59 | 745.33 | 1641.65 | 4.62 | 0.39 | 2.73 |
| | | 2.5 | 1.0 | 1525.09 | 1333.80 | 1147.56 | 160.45 | 0.41 | 4.67 |
| | | 1.8 | 2.0 | 1496.95 | 2096.30 | 935.00 | 380.55 | 0.69 | 4.95 |
| 50 | 1.6 | 4.0 | 0.25 | 1548.20 | 589.99 | 1299.51 | 90.26 | 0.31 | 2.36 |
| | | 2.3 | 1.0 | 1486.14 | 1366.26 | 1009.52 | 68.91 | 0.42 | 4.82 |
| | | 1.8 | 2.0 | 1476.76 | 1948.04 | 868.87 | 342.87 | 0.65 | 4.21 |

表5 各応力度・変形量及び変位量 (D₀ = 4550mm, B = 250mm)

| 曲率半径 R (m) | 継手セグメントの支持間隔 t (mm) | 継手上面の支持間隔 t (mm) | 地盤反力係数 k (kgf/cm ³) | 継手に生ずる圧縮応力度* (kgf/cm ²) | 主桁に生ずる引張応力度* (kgf/cm ²) | ボルトに生ずる引張応力度* (kgf/cm ²) | ボルトに生ずるせん断応力度* (kgf/cm ²) | 開口量 (mm) | リング先端の変位量 (mm) |
|------------|---------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------|----------------|
| 30 | 1.6 | 4.0 | 0.25 | 1417.09 | 414.42 | 912.61 | 39.63 | 0.22 | 2.35 |
| | | 2.0 | 1.0 | 1368.17 | 1121.09 | 617.33 | 223.13 | 0.35 | 4.88 |
| | | 1.6 | 2.0 | 1355.14 | 1518.65 | 535.26 | 369.36 | 0.55 | 4.85 |
| 40 | 1.6 | 4.0 | 0.25 | 1392.95 | 346.65 | 763.55 | 56.97 | 0.18 | 6.48 |
| | | 2.0 | 1.0 | 1367.44 | 1048.01 | 577.08 | 164.15 | 0.33 | 4.69 |
| | | 1.6 | 2.0 | 1349.69 | 1444.97 | 509.23 | 304.49 | 0.52 | 4.73 |
| 50 | 1.6 | 4.0 | 0.25 | 1360.54 | 322.33 | 709.95 | 22.86 | 0.17 | 6.48 |
| | | 2.0 | 1.0 | 1351.08 | 1007.00 | 584.50 | 128.95 | 0.32 | 4.57 |
| | | 1.6 | 2.0 | 1344.68 | 1402.80 | 494.37 | 265.59 | 0.50 | 4.68 |

表6 各応力度・変形量及び変位量 (D₀ = 4550mm, B = 500mm)

| 曲率半径 R (m) | 継手セグメントの支持間隔 t (mm) | 継手上面の支持間隔 t (mm) | 地盤反力係数 k (kgf/cm ³) | 継手に生ずる圧縮応力度* (kgf/cm ²) | 主桁に生ずる引張応力度* (kgf/cm ²) | ボルトに生ずる引張応力度* (kgf/cm ²) | ボルトに生ずるせん断応力度* (kgf/cm ²) | 開口量 (mm) | リング先端の変位量 (mm) |
|------------|---------------------|------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|----------|----------------|
| 30 | 1.6 | 4.0 | 0.25 | 1330.86 | 317.66 | 699.66 | 19.17 | 0.17 | 6.48 |
| | | 1.6 | 1.0 | 1304.10 | 1076.52 | 379.38 | 442.61 | 0.39 | 3.59 |
| | | 1.6 | 2.0 | 1309.10 | 1076.52 | 379.38 | 442.61 | 0.39 | 2.50 |
| | | 3.6 | 0.25 | 1324.40 | 311.75 | 556.20 | 114.41 | 0.14 | 4.98 |
| 40 | 1.6 | 1.6 | 1.0 | 1304.07 | 1045.71 | 388.52 | 415.94 | 0.38 | 3.49 |
| | | 1.6 | 2.0 | 1304.07 | 1045.71 | 388.52 | 415.94 | 0.38 | 2.45 |
| | | 2.8 | 0.25 | 1314.05 | 475.22 | 512.89 | 68.36 | 0.15 | 4.97 |
| 50 | 1.6 | 1.6 | 1.0 | 1304.28 | 1045.88 | 388.58 | 399.92 | 0.38 | 3.42 |
| | | 1.6 | 2.0 | 1304.28 | 1045.88 | 388.58 | 399.92 | 0.38 | 2.38 |