

硬質地盤における急曲線施工

THE CONSTRUCTION LOAD DUE TO THE SHARP CURVED LINE IN HARD SOIL CONDITIONS

佐々木幸一¹⁾・阿部修三²⁾・進藤良則³⁾・川嶋潤二⁴⁾・梶山雅生⁵⁾

Koichi SASAKI, Shuzo ABE, Yoshinori SHINDO, Jyunji KAWASHIMA, Masao KAJIYAMA

The shield tunnel project in TSUKUBA EXPRESS line adopted the method using wide-width RC segments for part of efforts to reduce project cost. The results of pre-analysis and experiment confirmed that its safety was by no means inferior to normal-width RC segments if designed properly.

However, Kotobuki tunnel project had concerns about the adverse effects on wide-width RC segments by the construction load due to the sharp curved line in hard soil conditions.

This text reports the results of the construction in Kotobuki tunnel and points to be considered in the application of wide-width RC segments in the sharp curved line.

Key Words: wide-width RC segments, sharp curved line, hard soil conditions

1. はじめに

つくばエクスプレス（常磐新線）のシールドトンネルでは、工事費縮減に向けた取り組みの一環として、幅広RCセグメントが採用された。事前の解析や実験の結果、設計上の対応策を施策することにより、幅広RCセグメントは従来幅のセグメントに対して遜色のない安全性を有していることが確認された。

寿トンネルは、当路線6箇所のシールドトンネルの中で、特に硬質地盤中の急曲線施工となるため、施工時荷重による幅広RCセグメントに対する影響が懸念された。

本文は、寿トンネルの施工結果と幅広RCセグメントを硬質地盤の急曲線部において使用する場合の留意点について報告するものである。

-
- 1) 正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部東京支社浅草鉄道建設所 所長
 - 2) 正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部東京支社工事第五課 課長補佐
 - 3) 正会員 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部東京支社工事第五課 課員
 - 4) 正会員 熊谷・大豊・大木 常新、寿T他特定建設工事共同企業体 所長
 - 5) 正会員 熊谷・大豊・大木 常新、寿T他特定建設工事共同企業体 副所長

2. 工事概要

寿トンネルは、東京下町の繁華街である浅草地区において延長約1,230mの鉄道用複線トンネルを泥水式シールド工法にて施工した。掘削外径は10.2m、セグメント外径は10.0m、セグメント内径は9.2mである。同トンネルは、6箇所 のシールドトンネルの中で最も深度が深く、土被りは約43mに達する。路線の線形は、最深度付近に



図-1 寿トンネル位置平面図

において平面曲線 $R=202m$ 、縦断曲線 $R=3,000m$ と、平面及び縦断の曲線が併存している。一次覆工は、ほぼ全線に亘り幅1.5mの幅広RCセグメント（桁高40cm、高剛性のインサート継手式）が採用された。また、シールド機は上記曲線部に対応するため、中折れ機構を有している。

3. 地質概要

路線全体の地層構成は、下位より極めて密な砂質土よりなる「江戸川層」(Ds5)、極めて密な砂礫からなる「東京礫層」(Dg4)といった洪積世前～中期の地層が堆積しており、その上位には洪積世中～後期の密な砂質土と硬い粘性土からなる「東京層」(Ds4・Dc4)および沖積世の「有楽町層」(As・Ac)が堆積している。急曲線部の掘削対象地質は、上部に東京礫層、中央から下部に江戸川砂層となっており換算N値100以上の硬質地盤である。また間隙水圧は、シールド中心部で350kPaに達する。

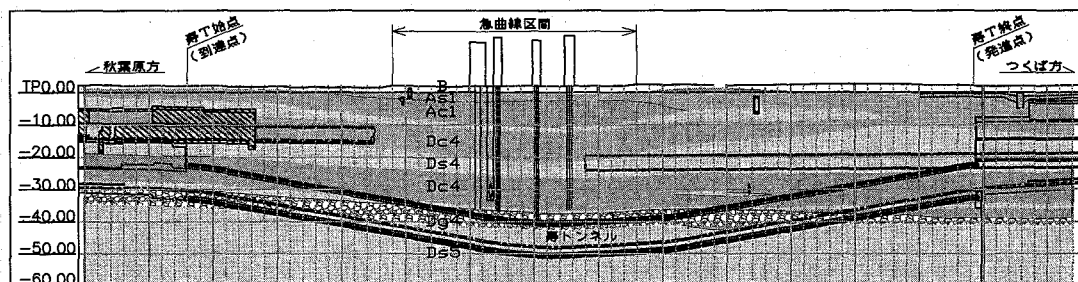


図-2 地質縦断図

4. 事前検討

セグメントの幅広化（1.5m）に伴い、セグメント端部（リング継ぎ手周辺）への応力集中が懸念され、以下に示す設計上の対応策が採用された。

- ① 等分割セグメントの採用：Kセグメントに対する添接荷重の均等化
- ② 高剛性継ぎ手の採用：添接荷重を小さくするため、リング全体の変形量を抑制
- ③ セグメント端部の補強：セグメント端部の主鉄筋間隔の密化

さらに、セグメント製作に先立ち、リング間継ぎ手インサート側へのせん断補強筋の追加およびセグメント継ぎ手隅角部への補強筋（無筋部分の欠け防止）の追加を実施した。

5. 施工結果（急曲線部の施工状況）

寿トンネルの一次覆工は、800リングが幅広RCセグメント、18リングがDCセグメント（幅1.2m）で構成されている。

急曲線部の平面線形図を図-3に示す。このうち、緩和曲線部の384～391リングの区間（以下A区間）と単曲線及び縦断曲線併存部の447～452リングの区間（以下B区間）の2区間において、セグメントの組辛さや若干のクラック等が発生した。（クラック調査の結果、クラック幅は全て0.2mm以下であり、構造上有害なものは見受けられなかった）

6. 原因の推定

（1）推進ジャッキの偏心による影響

幅広セグメントは、従来幅のセグメントと比較して1リング当たりの掘削距離が伸びるため、曲線施工部での推進ジャッキとセグメント面との偏心角度が大きくなる。この偏心によりセグメントのリング継ぎ手面には曲げモーメントが発生する。

図-4にリング毎のシールドジャッキとセグメント面との偏心角度（掘進完了時）を示す。曲線部の偏心角度は、概ね10～40分の間に入っているが、最大では50分弱・最小では-10分強となっている。一方、A区間では2～36分、B区間では-13分～38分となっており、他の区間と比較して特に偏心角度が大きいとはいえない。従って、推進ジャッキの偏心による影響とは考えられない。

（2）シールド推力による影響

硬質地盤における曲線施工部では、マシンと地山との競り（余掘り量不足などによる）やセグメントとマシンとの競り（余掘り量不足や線形管理の不備などによる）等の原因により、シールド推力が非常に高くなる場合がある。

図-5にリング毎のシールド推力を示す。シールド機の装備推力96,000kN（安全率1.9）に対して、曲線部での総推力は45,000～78,000kN、有効推力（切羽泥水圧の影響を除いた推力）は15,000～49,000kNとなっている。一方、A区間では総推力が50,000～70,000kN、

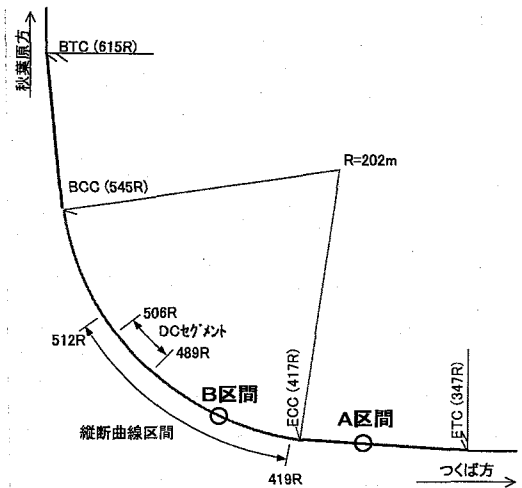


図-3 急曲線部の平面線形図

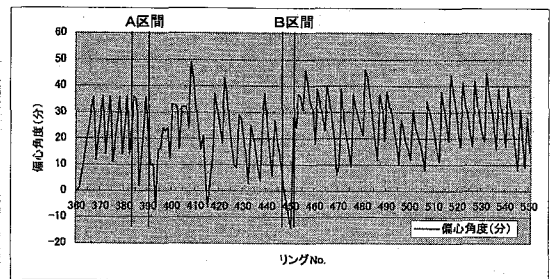


図-4 推進ジャッキの偏心角度

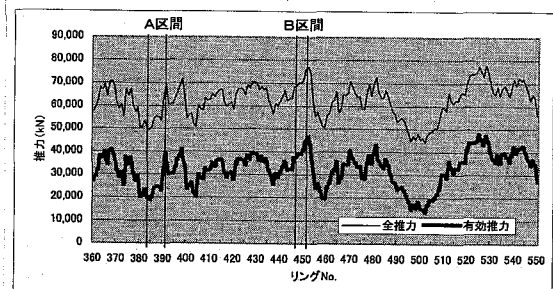


図-5 シールド推力

有効推力が19,000～40,000kNと低めであり、B区間では総推力が69,000～74,000kN、有効推力が39,000～47,000kNと若干高めとなっている。しかし、他の区間と比較して特に異常な推力とは認められないため、高推力による影響が主因とは考えられない。

(3) 推進ジャッキの片押しによる影響

急曲線施工では、掘進中にシールド機を内周側へ曲げていかなければならないため、内周側の推進ジャッキより外周側の推進ジャッキを多く使用し、いわゆる片押しの状態が発生する場合がある。片押し側には大きな推力が作用するとともに、リング面の段差やリング間の目開き等の原因となる。本工事では、シールド機に中折れ機構が装備されているため、くさび効果が働き極端な片押しは発生しなかった。

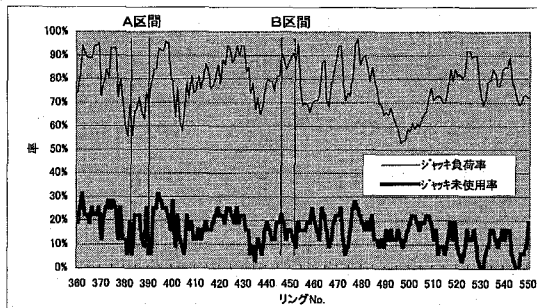


図-6 推力ジャッキの未使用率と負荷率

図-6にリング毎の推進ジャッキの未使用率(32本の装備ジャッキのうち使用しなかったジャッキの割合)と推進ジャッキ1本当たりの負荷率(ジャッキ能力3,000kN/本のうち作用した推力の割合)を示す。曲線部での推進ジャッキの未使用率は0～31%、推進ジャッキ1本当たりの負荷率は53～97%となっている。一方、A区間では未使用率が6～26%、負荷率が57～73%、B区間では未使用率が9～22%、負荷率が84～90%となっており、他の区間と比較して特に異常な数値とは認められない。従って、推進ジャッキの片押しによる影響とは考えられない。

(4) セグメントとマシンの競りによる影響

本施工の場合、通常のテールクリアランス(セグメント外面とマシンスキンプレート内面との離隔)は40mmである。しかし、R=202mの曲線区間では、セグメント組立位置とマシンテール出口位置とでテールクリアランスが変化し、本機では約20mmの差異が生じる。具体的な例を示すと、セグメント組立位置で左右各々40mmのクリアランスを確保しても、マ

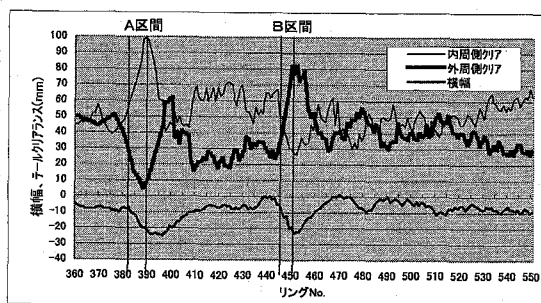


図-7 テールクリアランス量とセグメントつぶれ量

シンテール出口位置でのクリアランスは内周側で20mm、外周側で60mmとなる。従って、セグメントとマシンの競りを防止するには綿密な線形管理とクリアランス管理が必要となる。

図-7にリング毎の平面曲線内周側と外周側のクリアランス量及びセグメントのつぶれ量(横幅内空の設計値との差)を示す。A区間では外周側に競りが発生し、B区間では内周側に競りが発生している。また、両区間ともセグメントの横幅が減少し、縦長の卵形に変形している。一方、他の区間では、セグメントとマシンの競りやセグメントの変形は発生していない。従って、セグメントとマシンの競りによる影響が最大の原因であると推測される。

7. メカニズムの推定

(1) 不具合発生状況

- ① A区間では外周側の競りに対して内周側にクラックが発生した。一方、B区間では内周側の競りに対して外周側にクラックが発生した。
- ② クラックはセグメントがマシンから地山に出る時点（2リング目）で発生している。
- ③ クラックはセグメントの切羽側線路方向に水平に入っている。セグメントのリング間継手はインサート式であり、切羽側が埋め込みアンカーとなっている。

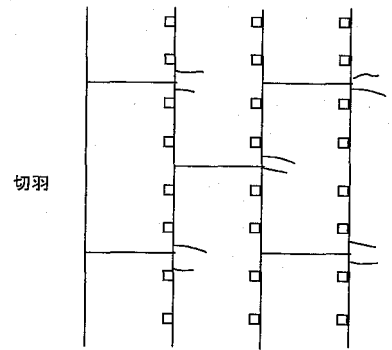


図-8 不具合発生状況

- ④ セグメントは縦長の卵形に変形している。
- ⑤ リング間の目違いは0～2mmであり、ボルト孔の余裕以上には発生していない。

(2) 不具合発生メカニズムの推定

- ① トンネルの線形（曲線の向き）とは関係なく、競った位置と反対側にクラックは発生している。従って、推進ジャッキの偏心や片押しによる影響ではない。
- ② 競りによりセグメント全体がマシンのスキンプレートから押されている。また、その反対側には硬質な地山と裏込め注入による地盤反力が存在するため、セグメントは縦長の卵形に変形しており、スプリング位置に正曲げが発生したと思われる。
- ③ 競りが発生した側は、マシンスキンプレートがガイドとなるためセグメントの変形が抑制されたものと推測される。しかし、その他の箇所（競りの反対側及び上下）はマシン内でクリアランスが十分確保されているため、外力による変形が容易に許容されたものと考えられる。従って、O型のつぶれではなくD型のつぶれが発生し、競った箇所の反対側に大きな変形が起こり、クラックが入ったものと推測される。

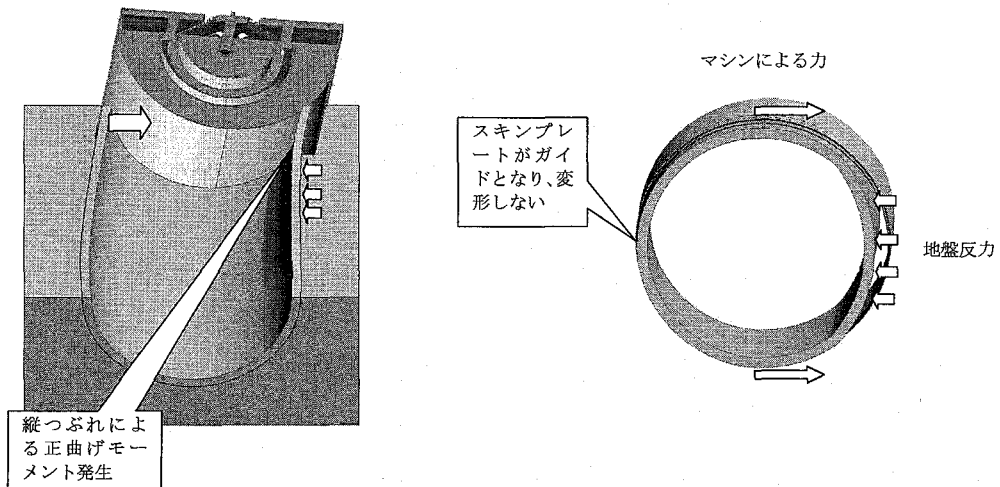


図-9 不具合発生メカニズムの模式図

8. 考 察

急曲線部でのセグメントに作用する施工時荷重としては、以下に示す項目が挙げられる。

- ① 推進ジャッキの偏心によるリング継ぎ手面への曲げモーメントの発生
- ② マシンと地山、セグメントとマシンの競り等による推力の増加
- ③ 推進ジャッキの片押しによる作用推力のアンバランス
- ④ セグメントとマシンの競りによるセグメントへの偏心力

施工データを検証した結果、不具合発生の主要原因となったのは、セグメントとマシンの競りによるものであることが推定された。

これに対処するには、綿密な線形管理とテールクリアランス管理を実施する他には方法がない。しかし、本工事における幅広RCセグメントの使用、硬質地盤における急曲線施工といった条件下では、以下に示す理由で困難を極めた。

- ① 幅広セグメントを使用することにより、1リング当たりのテーパ量が大きくなり、また急曲線部における異形セグメントと標準セグメントとの割付比を設計上4リング：1リングとしなければ線形を確保できない。そのため、セグメントの組み方が極端に限定され、蛇行修正をこまめに実施することができなかった。また、縦断曲線が併存していることにより、さらに組み方が限定された。
- ② 曲線部のシールド機姿勢制御は、切羽カットフェースにおける余掘量および範囲の設定と推進ジャッキのストローク差（左右・上下）設定により実施する。前者の余掘管理が、テールクリアランスに大きな影響を与える。具体的には、余掘量が不足するとシールド機は外周側に振れ内周側のテールクリアランスが不足し、余掘量が過大だとシールド機は内周側に振れ外周側のテールクリアランスが不足する。硬質砂礫地盤の場合は、特にこの関係が顕著に現れる。計算上の余掘量と実際の過不足は、地盤条件により大きく変化するので、トライアルにより最適余掘量を決定する必要がある。本施工では、計算値に対して1.4～2.5倍の余掘量を設定することにより、クリアランスの確保に努めた。

今後の同様な施工に際しては、掘削面（切羽）の線形管理・余掘管理・クリアランス管理・セグメントの線形管理を総合的にリンクさせた情報化施工を行う必要がある。

その他の補助的な対策として、シールド機長の短縮化・テール長の短縮化・クリアランス量の増大・セグメントリング継ぎ手数の増加等の手段が考えられるが、費用対効果を十分検討しなければならない。

9. まとめ

今回、幅広RCセグメントを使用した硬質地盤における急曲線施工という難題を前にし、本工事の最重要課題と位置づけ事前検討から施工管理まで細心の注意を払って施工した結果、大きな不具合もなく無事工事を完了することができた。今後は、具体的な線形管理の情報化施工方法の検討と不具合発生メカニズムのさらなる解明を行う所存である。

最後に、社会的要請のもと、工事費削減の目的でさらなるRCセグメントの幅広化が進むなか、本報告が一助となれば幸甚である。