

複合アーチ型シールドトンネルにおける隅部セグメントの開発 (その1) 設計的課題

(株) 大林組 正会員 ○前田 知就 正会員 武田 篤史
 (株) 大林組 正会員 佐藤 清 正会員 吉田 公宏

1. はじめに

複数の異なる曲率を組み合わせたセグメントによる複合アーチ型シールドトンネル(以下、複合アーチ断面)は、アーチ形状効果によって矩形断面に比べてセグメントの桁高低減を図ることができ、円形断面に比べて必要な空間を確保するための掘削断面を小さくすることができる特徴がある。このため、土被りや埋設物条件によっては、矩形や円形よりも複合アーチ断面が経済的に有利になる場合がある。一方、複合アーチ断面は、円形断面とは異なった力学特性を示し、特に土被りが小さい場合、地震時において隅部に腹圧力が発生する可能性がある。そこで、筆者らは、鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント(以下、SFRCセグメント)を用いた複合アーチ断面を対象として、小土被りの道路トンネルを想定し、常時および地震時の断面力を試算することによって、腹圧力の発生の有無を照査した。さらに、SFRCセグメントの特徴を考慮した隅部の補強配筋についての検討を行った。

2. 検討条件

(1) 検討断面および地盤条件

図-1にセグメント概要と、図-2に道路トンネルの断面図を示す。土被りは2m、トンネル形状は、複数の異なる曲率の円弧を組み合わせた複合アーチ断面である。隅部については、上隅部がR1300mm、下隅部がR400mmとなっており、セグメント厚は400mmから500mmへ変化している。側部と頂・底部とのなす角は、上隅部が134°、下隅部が130°である。セグメント幅は、1.7mとした。

地盤条件は、地表面から7.5mがN値4の粘性土層で、それ以深はN値50以上の硬質の砂礫層である。このように、せん断弾性波速度Vsの差が大きい地層境界では、地震時において境界付近に発生する地盤ひずみが大きくなり、トンネルに発生する断面力が大きくなる可能性がある。

(2) 解析条件

上記トンネルの隅部において腹圧力の発生の有無を調べるために、常時および地震時の断面力を解析によって算定した。

解析手法として、常時は、セグメント本体を線形梁要素、セグメント継手を回転ばね、リング継手をせん断ばねにモデル化した2リング千鳥組のはり-ばねモデル解析とした(図-3)。地震時は、部材の剛性低下を考慮するために、セグメント本体を非線形梁要素、継手部を非線形ばね要素とし、地盤を平面ひずみ要素とした相互作用モデルによる二次元動的応答解析とした。また、地震時解析も、シールドトンネル部は、添接効果を考慮するために2リングモデルとした。地震動は道路橋示方書(V耐震設計編)に示されるレベル2タイプII地震動から、トンネル上下端の層間変位が最大となる波形を選定した。

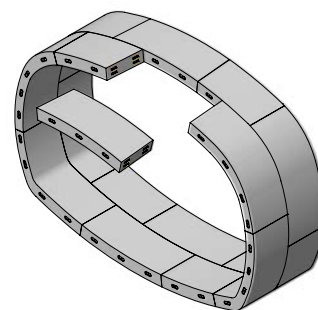


図-1 複合アーチ型シールドトンネル

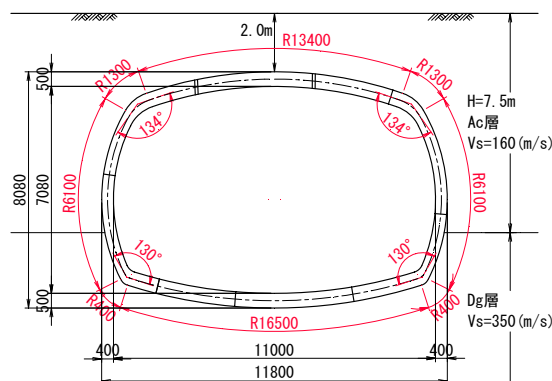


図-2 検討断面図

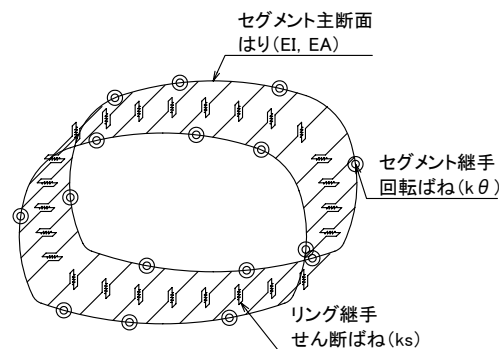


図-3 解析モデル

キーワード シールドトンネル, 小土被り, SFRCセグメント, 複合アーチ断面, 耐震設計, 腹圧力

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 (株)大林組 生産技術本部 都市土木技術部 TEL 03-5769-1305

3. 計算結果

曲げモーメント分布図について、常時解析結果を図-4に、地震時解析結果(左に変形時)を図-5に示す。常時では、頂部に最大の正曲げ(内側引張)が発生し、上隅部に最大の負曲げ(外側引張)が発生している。一方、地震時で、トンネルが左に変形する時は、右上隅部および左下隅部において正曲げが発生している。反対に、トンネルが右に変形する時は、左上隅部および右下隅部において正曲げが発生することとなる。

レベル2地震動に対する試算では、隅部に発生する正の曲げモーメントは、上・下隅部ともに約550kN・m、軸圧縮力は約100kNであり、いずれも降伏モーメント約660kN・m以下の結果であった。

4. 隅部セグメントの配筋案

複合アーチ断面の隅部に正曲げが作用すると、ラーメン構造の隅部に正曲げが作用した時と同様に、内力の方向転換によって軸線の直角方向に腹圧力が作用する。そのため、隅部の対角線方向に引張力が発生し、十分な鉄筋が配置されていない場合、対角線と直交する方向にひび割れが発生する(図-6)。腹圧力によって発生する隅部の斜め引張力は、幾何的条件により式(1)によって推定できる¹⁾。

$$T = 2 \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot T_H \quad (1)$$

(T: 斜め引張力, T_H : 鉄筋に作用する引張力, α : 隅部の角度)

式(1)によると、発生断面力が同じ場合、上隅部に比べて側部と頂・底部のなす角が小さい下隅部において、より大きな斜め引張力が作用することがわかる。そこで、下隅部を対象に補強配筋を検討した。

本検討で選定したSFRCセグメントは、コンクリートに混入した鋼繊維による補強効果を期待できるため、RCセグメントに比べて主鉄筋量を低減し、配力筋・フープ筋を省略したセグメントである²⁾。そのため、隅部に腹圧力が作用する場合、これに抵抗するための鉄筋を別途配置する必要がある。式(1)から腹圧力に抵抗するための鉄筋量は推定できるものの、SFRCセグメントにおける鋼繊維による引張応力の分担を考慮した配筋を検討することとした。具体的な例として、図-7に示す2種類の配筋を検討した。案1は内側と外側の主鉄筋を平行に配置し、帯鉄筋によって腹圧力Tに抵抗させる案であり、案2はトンネル内側の主鉄筋を隅部でクロスさせて外側主鉄筋の位置にて定着させ、 $T_{H1}' \cdot T_{H2}'$ で腹圧力Tに抵抗するとともに、帯鉄筋によって補強する配筋案である。

5. まとめ

シールドトンネルのセグメントの設計は、本体部材を梁部材として設計を行うのが一般的である。しかし、複合アーチ断面の隅部のように、曲率半径が小さい部材に正の曲げモーメントが作用する場合、腹圧力による影響を考慮し隅部での損傷を防止する必要がある。本研究では小土破りの複合アーチ型シールドトンネルを対象とし、隅部における腹圧力の発生の有無を試算し、SFRCセグメントに対する隅部の配筋案を示した。試算の結果、腹圧力の発生が予想されたが、本稿で検討した配筋案等を対象として、別途、FEM解析および実大セグメントによる載荷実験によって検証を行った。解析結果については「その2」に、実験結果については、「その3」にて示す。

参考文献 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲ，コンクリート橋編，平成14年3月

2) SFRCセグメントの実施工への適用 土木学会第61回年次学術講演会概要集，6-088，2006.9

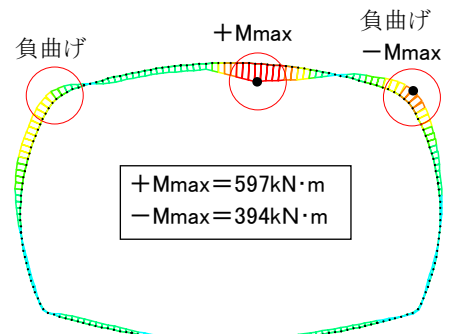


図-4 常時曲げモーメント図

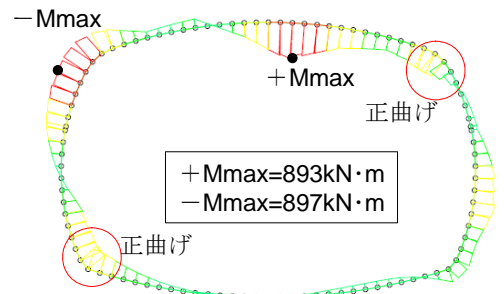


図-5 地震時曲げモーメント図

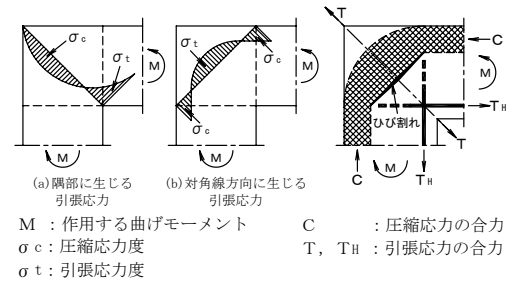


図-6 ラーメン構造隅部の応力状態¹⁾

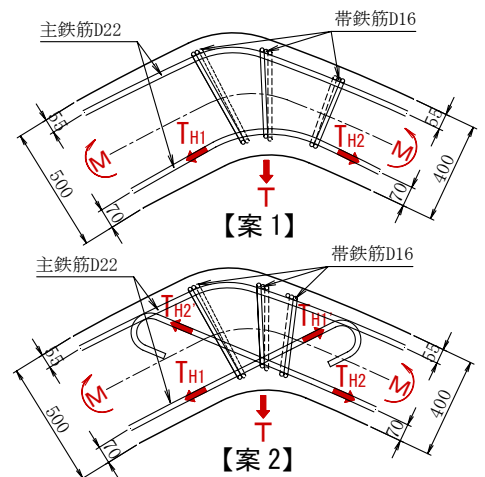


図-7 隅部配筋案