

## 多リング解析を用いたシールドトンネルの開口影響に関する一考察

パシフィックコンサルタンツ(株)  
(株)ジオ・ソリューション

事業推進部 技術管理課 正会員  
交通技術本部 トンネル部 正会員  
代表取締役 非会員

増野 正男<sup>1)</sup>  
○木谷 努<sup>2)</sup>  
細井 秀憲<sup>3)</sup>

### 1. はじめに

セグメントに開口を設けると、開口周辺のセグメントにその影響が3次元的に及ぶ。しかし、現状ではその3次元的な影響の範囲内にあるセグメントの設計手法は、2次元モデルを主体とする場合も多いなど、十分確立されておらず、明確な設計基準も整備されていない。そこで、本報告では、今後の設計手法確立のための基礎資料を得ることを目的とし、継手ばねをモデル化した擬似3次元解析として多リングシェルモデルおよび多リングはりばねモデルによる解析を行い両解析手法における開口による影響について検討し、開口補強設計時の留意点について考察した。

### 2. 多リング解析の概要

本報告では、本報告は、図-1に示すように、セグメントピース間継手を回転ばね、リング間継手をせん断ばねとしてモデル化した擬似3次元解析として多リングはりばね解析およびシェル解析を行う。両解析では、径  $D=12.3\text{m}$  で、幅  $1.5\text{m}$  のリングを12リング分モデル化した(図-2参照)。解析ケースとしては、表-1に示す通りまず、参考ケースとして開口がない場合を解析する。そして、トンネルスプリングラインに幅  $3\text{m}$  (2リング幅に相当)、高さ  $3\text{m}$  の正方形の開口を設けるケースを基本ケースとする。そして、上記ケースで考慮しなかった接線方向地盤反力を考慮し、開口の影響がどのように変化するか確認した。セグメントは、桁高  $40\text{cm}$  で厚さ  $25\text{mm}$  主桁をリング幅  $1.5\text{m}$  に3本有する鋼製セグメントをシェルや梁としてモデル化した。荷重条件は、鉛直土圧として1D分の有効土圧(土の水中単位体積重量  $\gamma'=9\text{kN/m}^3$ )、側方土圧係数を  $0.35$  とし、水圧は天端で  $40\text{m}$  分を考慮した。地盤反力係数は、 $kn=50\text{MN/m}^3$  とした。

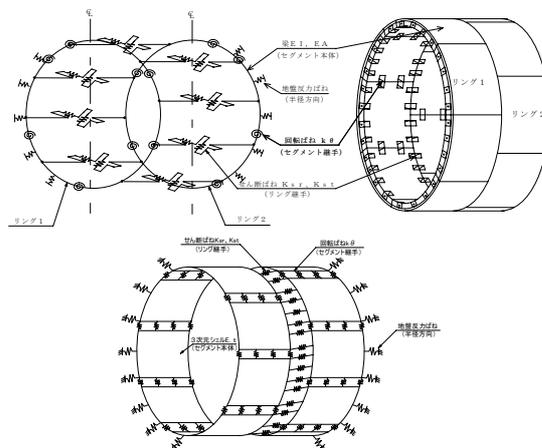


図-1 擬似3次元解析の概要

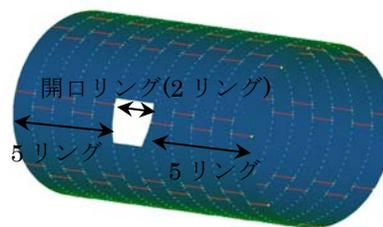


図-2 多リング解析モデル(シェルの場合)

### 3. 多リング解析の結果

#### 3.1 開口の影響

開口の影響について、荷重伝達の状況が明確となる周方向軸力分布に着目して解析手法による結果の違いを考察する。開口のない場合(解析ケース0)では、荷重条件が同一であるため、多リングはりばね解析と多リングシェル解析の軸力分布は明確な差がない。

次に開口がある場合(解析ケース1)の比較について述べる。図-3は開口上縁軸線(延長方向)における軸力分布グラフである。これによると開口がない場合、ほぼ均等に発生しており、当然リング間での違いはない。一方、開口がある場合、軸力は特に開口隣接リング( $\pm 1.5\sim 3\text{m}$ )に集中している。多リングシェル解析では、その集中が開口側半分程度( $0.75\text{m}$ 程度)に顕著であり、逆に開口リング自体および開口隣接リングの開口逆側は軸力が軽減している様子が分かる。すなわち、多リングシェル解析では、開口隣接リングの“ゆがみ”のような

表-1 解析ケース表

ケース	解析モデル	地盤ばね	開口寸法(m)
0	2手法(多リング)	法線 $kn$	—
1	のシェルと	法線 $kn$	3×3
3	はりばね	法線 $kn$ と接線 $1/3kn$	

開口, 多リング解析, シェル解析, はりばね解析, 影響範囲, シールドトンネル

<sup>1)</sup> 東京都多摩市関戸 1-7-5 TEL042-372-6466

<sup>2)</sup> 東京都新宿区西新宿 2-7-1 TEL03-5989-8323

<sup>3)</sup> 東京都杉並区成田東 5-15-17 TEL03-3391-1851

挙動が表現されている。一方、多リングはりばね解析では、リング内の軸力分布が不明であり、平均的軸力が梁軸力として算出されていると考えられ、開口近傍の軸力集中が過小評価となっているものの、隣接リング開口逆側の軸力は過大評価となっている。さらに、開口の影響は開口隣接2リング目(±3~4.5m)まで及んでおり、シェル解析の方がはりばね解析より、隣接リングの“ゆがみ”の影響が及び、小さな軸力が発生している。

図-4 に多リングシェル解析の場合の周方向軸力コンター図を示す。これによると、開口の裏側にも軸力の変動が認められる(図中丸囲い部)。そこで、開口裏側の延長方向軸力分布を両解析手法でグラフ化したものが図-5 である。これによると、多リングシェル解析で見られる開口リング自体の“ねじれ”の影響が開口裏側にまで及び、開口リングにおいては、開口中心側(0m)で軸力の増加が、開口中心逆側(±1.5m)で軸力の減少が見られる。一方、はりばね解析の場合は、開口裏側の軸力は、開口がない場合の軸力とほとんど変化がない。

3.2 接線方向地盤ばねを考慮した場合

接線方向地盤反力を考慮したケース(ケース2)の両解析手法での軸力分布について述べる。開口上縁軸線(延長方向)における軸力分布グラフを図-6 に示す。ケース2では、開口上縁軸線(延長方向)における軸力の集中の度合いは、接線方向の地盤ばねを考慮することで大幅に軽減され、隣接リング開口逆側の軸力の軽減と相殺することで、隣接リングの平均的軸力は、はりばね解析での軸力とほぼ同等になった。また、開口裏側の延長方向軸力分布もシェル解析について図-6 に示す。それによると背面軸力は、開口がない場合とほとんど差がない。このことから、硬質地盤のような接線方向地盤反力がある程度期待できる場合では、開口セグメントの“ねじれ”の影響が地盤の摩擦抵抗により、かなり軽減されていることが分かる。

4. まとめと設計上の留意点

既述のように、硬質地盤のように接線方向地盤反力がある程度期待できる場合、期待できない場合に差があった開口隣接リングの軸力は、平均で見ればほぼ同一となっていた。一方、開口隣接リングの“ゆがみ”の影響は、開口からの距離によって両解析手法の軸力の差異として認められ、それは接線方向地盤反力が期待できない場合に顕著である。この設計上の対処としては、多リングシェル解析を用いて、各部位の軸力分担を詳細に求め、“ゆがみ”に対応できる剛な継手板やスキムプレートとするなどの方法があるが設計の実務では煩雑である。よって、現在の設計体系の延長線として多リングはりばね解析を用いた設計を行う場合には、これまでの設計実績がそうであったように開口補強桁をトンネル縦断方向に設置し、開口周辺のセグメント挙動を“ねじれ”のない平均的なものにする必要がある(図-7 参照)。逆に言えば、各リングの平均的な軸力を算定するはりばね解析で設計を行う場合は、開口補強桁等でセグメント挙動を縦断方向に極力拘束・均一化することが前提となっていると言える。

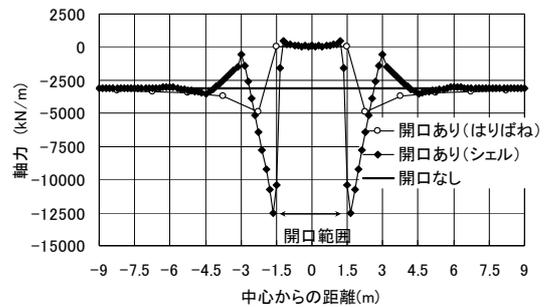


図-3 解析手法の違いによる軸力分布

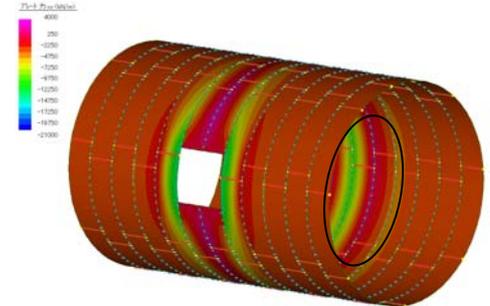


図-4 シェル解析による軸力コンター図

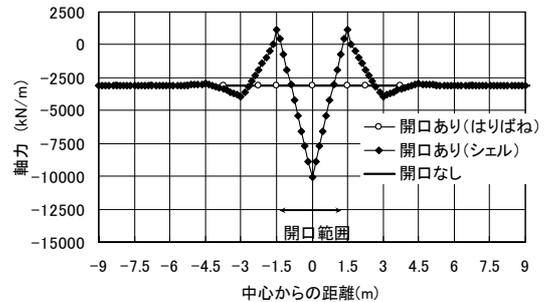


図-5 開口裏側の軸力分布

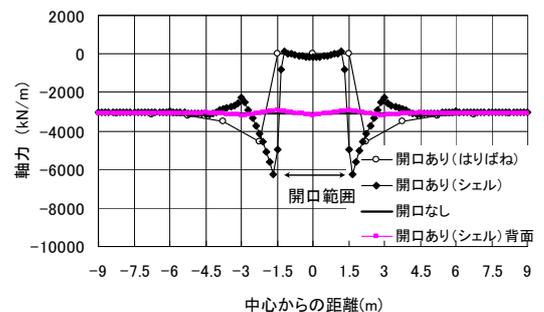
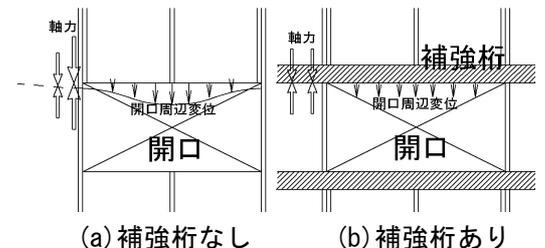


図-6 接線方向地盤反力による軸力分布



(a) 補強桁なし (b) 補強桁あり 図-7 開口補強桁の有無とセグメント挙動