

## 1. 序論

### 1.1 研究背景

トンネル覆工設計における解析的手法は、主として連続体モデルによる解析とはりばねモデルによる解析の二つに大別される。

連続体モデルによる解析は、解析対象である地山やトンネルの幾何学的構造が複雑な場合でもモデル化が可能であること、複雑な地質構成を成す地山の力学特性のモデル化ができ、掘削に伴う地表面への影響の推定が可能であること、三次元の取り扱いが可能であることなどの優れた点を有する。連続体モデルにおいて、現在一般的に用いられているのは、解析対象とする地盤に初期応力解析として自重を作用させた後、掘削による応力解放を応力境界として掘削面に導入して解析を行う手法が一般的である。しかし、この手法で変位を求めようとした場合、解析領域の下方の範囲設定や地盤の弾性係数、応力解放率が解析結果に大きく影響するという問題がある。

一方、はりばねモデルによる解析は、地盤とトンネル覆工の相互作用を全周にわたり地盤ばねで表現することで、覆工に作用する断面力を精度よく算定することができる。さらに近年、掘削面のトンネル内側への変位による主働側の土圧の評価、覆工を設置するまでの掘削面変位の評価、地山の自立の表現が可能な変位境界を用いた解析モデルが開発された。この解析モデルは軟弱地盤から硬質地盤にわたり、前述した応力境界条件で解析した場合と比較し、覆工作用土圧、覆工の変位・断面力を合理的に表現することができることがわかっている。しかし、はりばねモデルは、トンネル切羽の進行に伴う影響、地表面沈下の算定ができないという欠点があり、これらの検討を行うには、他の設計方法を併用することが必要である。

### 1.2 研究目的

本研究では、既往の変位境界を用いたはりばねモデルを拡張し、トンネル周辺地盤を平面ひずみ要素でモデル化した変位境界を用いた連続体モデルを開発する。また、開発したモデルに対し、地盤反力係数と有効裏込注入率についてパラメータスタディを行い、トンネル覆工の挙動とトンネル覆工に発生する土水圧について検討を行う。さらに、開発したモデルと地盤反力曲線を用いたはりばねモデルの解析結果を比較し、本解析モデルの妥当性を検証する。

以上から、トンネル周辺地盤の挙動を表現することができ、かつ、地盤と覆工の相互作用が表現可能な連続体モデルによるトンネル覆工設計法を構築することを本研究の目的とする。

## 2. 解析内容

### 2.1 解析モデル

#### 2.1.1 地盤反力曲線を用いたはりばねモデル

図 2-1 にははりばねモデルの概要図を示す。地盤反力曲線を用いたはりばねモデルは、従来のはりばねモデルに加え、周辺地盤による作用荷重の分担を評価できること、覆工の全周にわたり応力再配分を評価できるといった特徴を有する。また、裏込注入率による覆工作用荷重への影響を評価することも可能である。

#### 2.1.2 変位境界を用いた連続体モデル

図 2-2 に本研究で開発した、変位境界を用いた連続体モデルの全体図を示す。

本解析モデルは、前述したトンネル周辺地盤の変位に対する応力解放率、解析領域の大きさが与える影響を解消することが可能である。また、地盤と覆工の間に配置する地盤ばねの特性を有効裏込注入率の値に応じて変化させることで、地盤に初期変位を導入することが可能である。

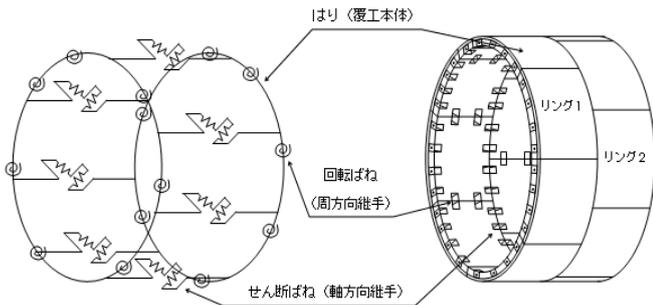


図 2-1 はりばねモデル

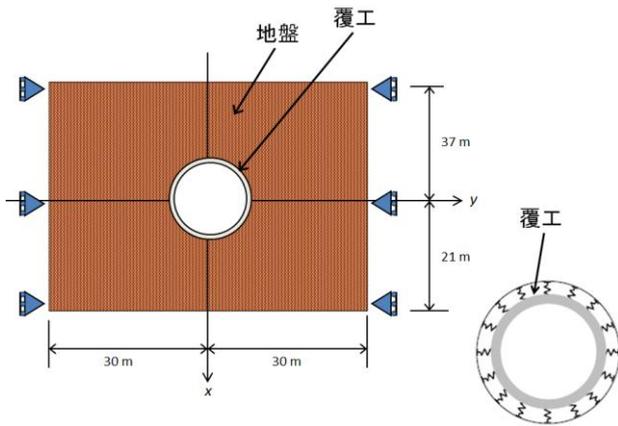


図 2-2 本解析モデル全体図

## 2.2 地盤条件

本解析では、N値50以上を示す洪積粘性土層(土丹層)が連続するような硬質地盤中のシールド掘進を想定し、地盤条件を設定した。図 2-3 にトンネル位置と地盤条件を示す。

土被りは33.9m、地下水位はGL-3.68mとした。この地盤条件から算出したトンネル天端とトンネルSL(スプリングライン)位置での作用全土水圧を表 2-1 に示す。地盤反力係数は、砂質土での最大値である50(MN/m<sup>3</sup>)とさらに良質である500(MN/m<sup>3</sup>)の二種類に設定した。

## 2.3 解析入力条件の設定

### 2.3.1 変位境界を用いた連続体モデル

変位境界を用いた連続体モデルにおける地盤は二次元ひずみ要素にてモデル化を行っているため、解析に使用した地盤物性値は弾性係数Eとポアソン比νのみである。土圧係数は、トンネル

SL位置での静止時における鉛直方向の作用全土水圧と水平方向の作用全土水圧の比として、土圧係数からポアソン比を算出した。変位境界を用いた連続体モデルにおける地盤入力物性値を表 2-2 に示す。

### 2.3.2 地盤反力曲線を用いたはりばねモデル

地盤反力曲線を用いたはりばねモデルでは、地盤ばね特性を天端に作用する鉛直土圧、地盤反力係数、土圧係数のみで表現している。静止時の鉛直土圧は表 2-1 に示した天端での鉛直方向の作用全土水圧とし、水平土圧係数は変位境界を用いた連続体モデルと同じ値とした。土圧係数の下限値は地山が自立することを想定し、0とし、上限値は既往の研究を基に5とした。地盤反力曲線を用いたはりばねモデルでの入力物性値を表 2-3 に示す。

### 2.3.3 覆工構造条件および裏込注入条件

覆工は一般的なRCセグメントとし、弾性係数とポアソン比、自重についてはトンネル標準示方書[シールド工法]・同解説に記載のある値を用いた。有効裏込注入率は100%、96%の2ケースで解析を行った。これらから、地盤と覆工との間の初期変位を算出し、地盤ばねに初期変位量を導入することで、裏込注入による覆工作用荷重への影響を評価した。覆工構造条件および地盤ばねの応力-変位の関係をそれぞれ表 2-4、図 2-4 に示す。

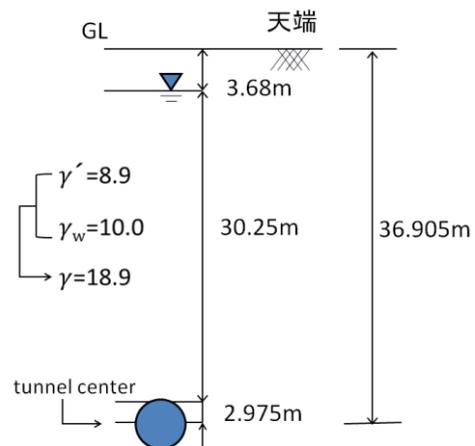


図 2-3 トンネル位置と地盤条件

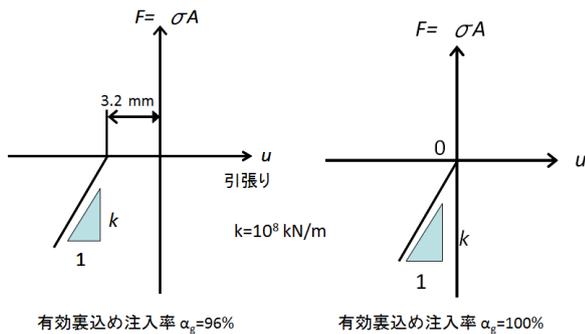


図 2-4 地盤ばねの応力-変位関係

表 2-1 トンネル天端と SL 位置での作用土水圧

	tunnel crown	tunnel center
$\sigma_{vo}$ (kN/m <sup>2</sup> )	338.765	365.234
$\sigma_w$ (kN/m <sup>2</sup> )	302.5	332.25
$\sigma_{H0}$ (kN/m <sup>2</sup> )	118.567	127.832
$\sigma_{H0}$ (kN/m <sup>2</sup> )	421.067	460.082
$\sigma_{vo}$ (kN/m <sup>2</sup> )	641.265	697.484

表 2-2 地盤入力物性値

ポアソン比 $\nu$	0.400	
地盤反力係数 $k$ (MN/m <sup>3</sup> )	50	500
弾性係数 $E$ (MN/m <sup>2</sup> )	120.55	1205.5

表 2-3 地盤反力曲線を用いたはり-ばねモデルでの地盤入力物性値

$\sigma_{vo}$ (kN/m <sup>2</sup> )	641.265	
土圧係数	$k_{hmin}$	0
	$k_{h0}$	0.66
	$k_{hmax}$	5
	$k_{vmin}$	0
	$k_{v0}$	1
	$k_{vmax}$	5
地盤反力係数 $k$ (MN/m <sup>3</sup> )	50	500

表 2-4 覆工構造条件

種類	平板型RCセグメント
内径 (m)	5.7
外径 (m)	6.2
厚さ (m)	0.25
幅 (m)	1
弾性係数 (MN/m <sup>2</sup> )	33000
ポアソン比	0.4
自重 (kN/m <sup>3</sup> )	26

### 3. 解析結果と考察

#### 3.1 解析パターンと出力内容

本解析では、地盤反力係数  $k=500\text{MN/m}^3$  で有効裏込注入率  $\alpha_g=96\%$ (Case1),  $100\%$ (Case2),  $k=50\text{MN/m}^3$  で、 $\alpha_g=96\%$ (Case3),  $100\%$ (Case4)の計 4Case について解析を行った。また、覆工変位と静止時作用土圧・作用全土圧を解析対象とした。

#### 3.2 解析結果

本解析モデルによる解析結果および地盤反力曲線を用いたはり-ばねモデルによる解析結果を図 3-1 に示す。この図から以下のことがわかる。

- 1)地盤が軟質の場合、覆工の変位は両モデルともおよそその値が一致する。
- 2)両モデルとも、変形のモードや覆工に作用する土水圧のオーダーは同様の傾向が見られる。このことから、本解析モデルの妥当性が検証できたといえる。
- 3)初期応力解析を行っていないため、作用全土圧ははり-ばねモデルに比べ大きくなる。

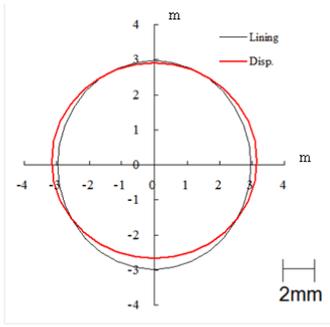
### 4. まとめ

既往の変位境界を用いたはり-ばねモデルを拡張し、トンネル周辺地盤を平面ひずみ要素でモデル化した変位境界を用いた連続体モデルを開発した。その結果、地盤反力曲線を用いたはり-ばねモデルと変位境界を用いた連続体モデルで変形のモードや覆工に作用する土水圧のオーダーは同様の傾向を示し、本解析モデルの地盤と覆工との相互作用のモデルの妥当性が検証できた。

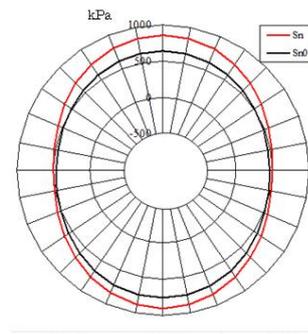
今後の課題としては、初期応力解析の実施、裏込注入率や地盤反力係数のパラメータスタディの実施、現場計測データとの比較などがあげられる。

以上を行ったうえで、モデルの三次元化を目指す。

連続体モデル

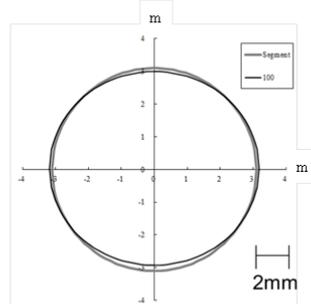


覆工変位(a)

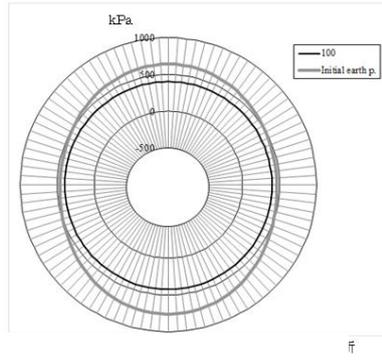


覆工作用土水圧(a)

はりばねモデル



覆工変位(a)

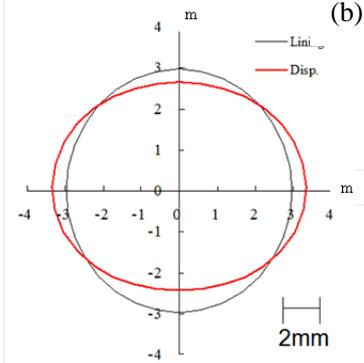


覆工作用土水圧(a)

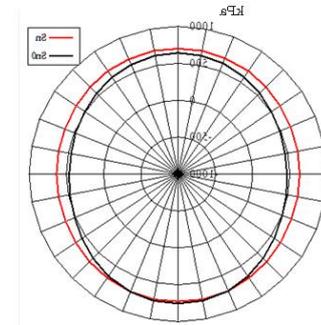
(a) :  $k=50\text{MN/m}^3$ ,  $\alpha_g=100\%$

(b) :  $k=500\text{MN/m}^3$ ,  $\alpha_g=100\%$

連続体モデル

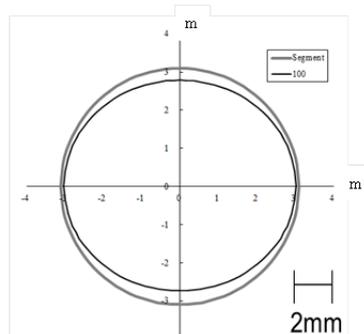


覆工変位(b)

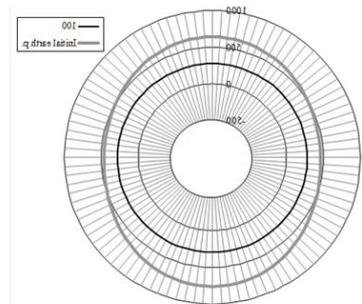


覆工作用土水圧(b)

はりばねモデル



覆工変位(b)



覆工作用土水圧(b)

図 3-1 連続体モデルおよびはりばねモデルによる解析結果