

主動土圧を考慮できる地盤ばねによる大深度地下トンネルに作用する土水圧の検討

地盤工学研究室 久保田絢一

指導教官 杉本光隆

1.はじめに

近年、都市部では地下空間の有効利用が進み、沖積層からより深くに堆積している洪積層でのシールドトンネルの施工が増えている。このような大深度地下では、シールド覆工に作用する有効土圧が減少し、覆工に水圧相等の力しか作用していないケースが報告されている^{1) 2)}。このことから、大深度では地山が自立するため、土圧が覆工周辺の地山に分担されシールドトンネル覆工に土圧が作用しないという現象が起きていると考えられる。

本論文では、計測された大深度地下シールドトンネルの覆工に作用する土水圧を、岡崎・杉本らによって改良されたはり - ばねモデルによって再現し、当モデルの妥当性を確認することを目的としている。

2.解析モデル

本研究で用いる解析モデルは、岡崎・杉本らによって改良されたはり - ばねモデル³⁾を用いる。このモデルは従来のはり - ばねモデル⁴⁾では表現できていない作用土圧の影響や裏込注入の影響を考慮することができる。

2.1 作用土圧の表現

本解析モデルでは、地盤と覆工の相互作用を表現するモデルとして、非線形の地盤ばねを用いる。この地盤ばねで土圧係数と地盤変位の関係を表現する(図1)。ばね定数は地盤反力係数と土圧係数からなる双曲線関数で与えられる。この関数は地盤が受働側に変位すると土圧係数が大きくなり、逆に主動側に変位すると土圧係数は小さくなる。覆工と地山が完全に非接触になると土圧係数はゼロとなる。その結果、覆工に作用する土圧が低減される。

2.2 裏込注入の表現

大深度のように自立性が高い硬質な地山では裏込注入の影響が大きいことが報告されている²⁾。そこで本解析モデルでは、裏込め注入率とテールポイド幅から推定される空隙を表現するため、地盤ばねに強制変位 δ_{shift} を与える(図2)。裏込注入を評価する強制変位量は以下の式で求める。

$$\delta_{shift} = \alpha \times (t_v / 100 - 1)$$

δ_{shift} : 強制変位 (m)

α : テールポイド (m)

t_v : 裏込注入率 (%)

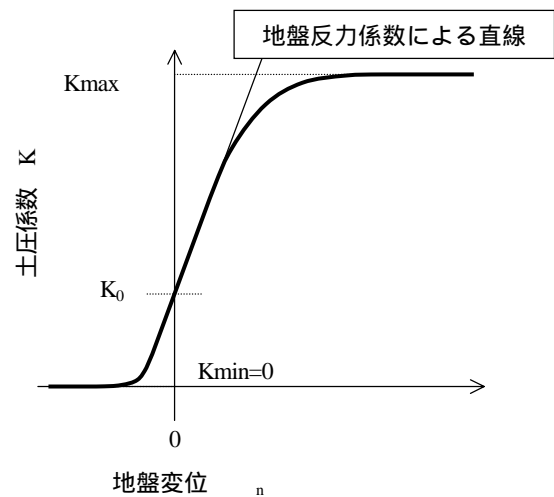


図1 地盤変位と土圧の関係

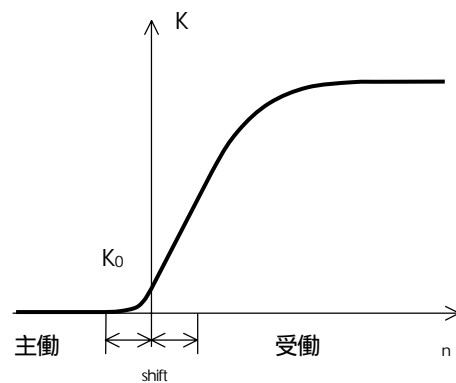


図2 強制変位の導入

3.解析現場

本研究の解析対象となった、寝屋川北部シールドトンネル、久宝寺シールドトンネルの施工概要を表1に、掘削位置地質概要を表2に示す。これらのシールドトンネルは、大阪府寝屋川水系改修工営所が寝屋川流域の総合治水対策の一環として施工した地下放水路である。本研究では、シールドトンネルでの覆工作用圧力の長期的な挙動を把握するために計測された土水圧（図3）を比較対象とする。この土水圧は、シールド掘進500日後の値であるため、シールドマシンとの距離があり、裏込材は完全に圧密固結している。

表1 施工概要

計測断面	寝屋川北部	久宝寺
工法	泥土圧式	泥土圧式
セグメント種類	NM セグメント	NM セグメント
セグメント外径(mm)	8240	7400
土被り(m)	37.635	22.280
土被り比	4.57	3.01
テールボイド(mm)	85	80
平均裏込注入圧(kN/m ²)	4.0	4.5
最大裏込注入圧(kN/m ²)	5.0	5.0
裏込注入率(%)	123	132
上端鉛直土圧(kN/m ²)	439.910	193.123
上端鉛直水圧(kN/m ²)	246.350	204.800

表2 掘削位置地質概要

計測断面	寝屋川北部	久宝寺
地層	洪積粘土層	(上半)洪積粘土層 (下半)洪積砂礫層
平均N値	7	(上半) 19 (下半) 60
側方土圧係数	0.5	0.5
地盤反力係数(kN/m ³)	10000	10000

4.解析条件

地盤反力係数、裏込注入率をパラメータとして覆工の変位、作用有効土圧を解析する。地盤反力係数 10000、20000、50000、100000、200000、500000、1000000kN/m³の7ケース、裏込注入率 80、85、90、92、94、96、98、100、105、110%の10ケースについてパラメータ解析を行った。

5.解析結果

地盤反力係数、裏込注入率の変化に伴うセグメント作用有効土圧、セグメント変位について解析した。ここで、正の変位を受働側、負の変位を主動側の変位とする。本稿では本モデルによる寝屋川北部の解析結果および、寝屋川北部、久宝寺の計測値と解析値の比較を示す。

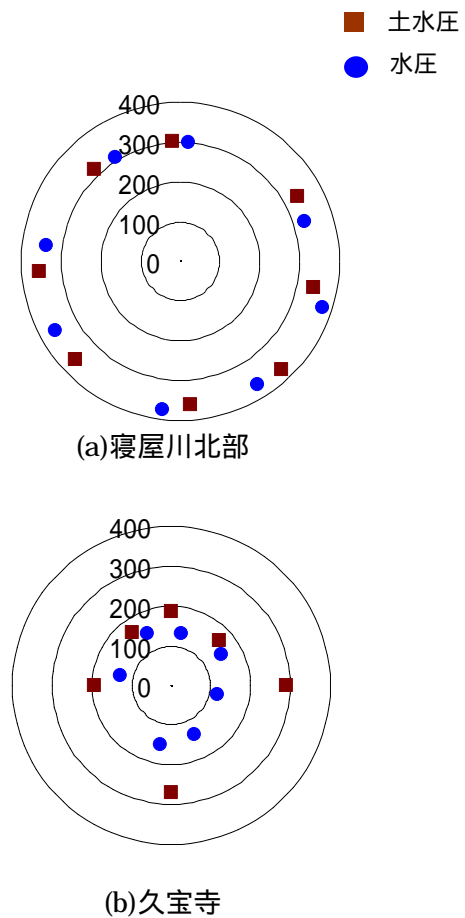


図3 現場計測データ

5.1 地盤反力係数の影響

図4に変位 - 地盤反力係数、図5に作用有効土圧 - 地盤反力係数を示す。ここでの裏込注入率は100%としている。

地盤反力係数の増加により、変位が小さくなり、作用有効土圧も小さくなっていることがわかる。側方土圧係数(=0.5)の影響で、作用有効土圧が縦長の分布、変位が横長の分布を示している。また、地盤反力係数が100000kN/m³以上になると、変位、作用有効土圧はともに、最小値に収束している。

以上より、地盤反力係数が大きくなると、微小の変位で土圧が大きく変化するため、覆工の形状は真円に近くなり安定すること、また、地盤反力係数が100000kN/m³以上になると地山は完全に自立することがわかる。

5.2 裏込注入の影響

図6に変位 - 裏込注入率、図7に作用有効土圧 - 裏込注入率を示す。ここでの地盤反力係数は100000kN/m³としている。

これらの図より裏込注入率の増加に伴い作用有効土圧は大きくなるが、裏込注入率が95%以下になると、全周で作用有効土圧はほぼ零となり、下端が主働側に大きく変位していることがわかる。

この結果より、裏込注入率が小さすぎると、地山が自立し、作用有効土圧が零となり、浮力によってセグメントが天端に押しつけられることがわかる。また、裏込注入率が大きすぎると全周で作用有効土圧が増加する。前者は曲げモーメント、後者は軸力が卓越する原因となる。

5.3 従来モデルとの比較

図8に変位分布図の比較、図9に作用土水圧分布図の比較を示す。ここで、地盤反力係数100000kN/m³、裏込注入率100%である。

従来のモデルと比べ、本解析モデルによる変位、作用有効土圧は小さく、真円に近い分布を示す。特に底部では従来のモデルと本モデルの差が顕著

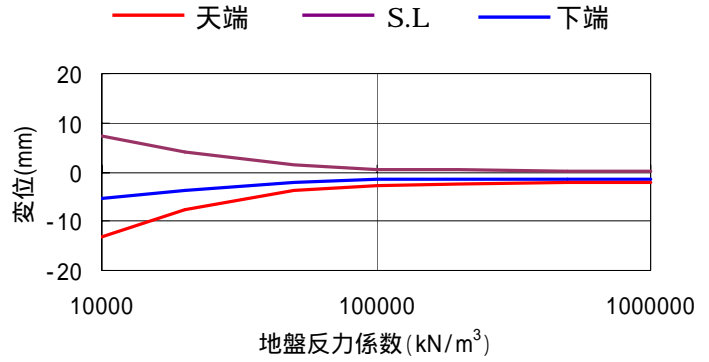


図4 変位 - 地盤反力係数

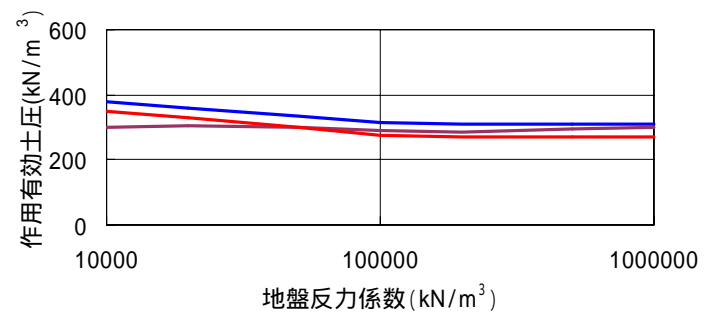


図5 作用有効土圧 - 地盤反力係数

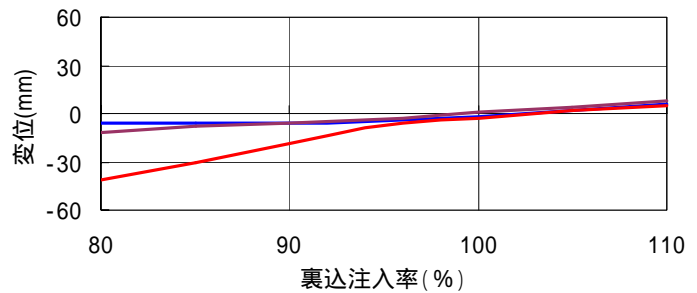


図6 変位 - 裏込注入率

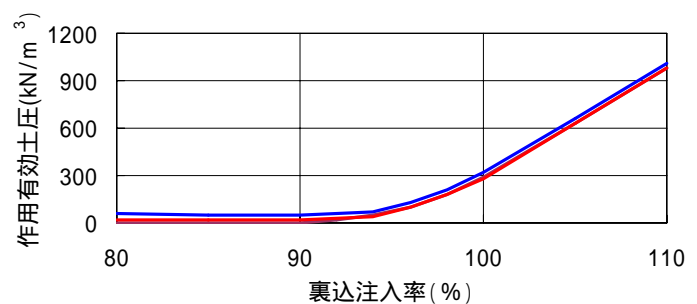


図7 作用有効土圧 - 裏込注入率

である。

これらは、浮力の影響で覆工が上方に剛体変位すること、本モデルは主働土圧を考慮できることから、下端で主働土圧が生じ、作用有効土圧が減少し、一方、天端では、下端より大きな主働土

圧が発生するためであると考えられる。

5.4 計測値との比較

作用有効土圧の計測値と解析値が概ね一致する、各地盤反力係数と裏込注入率の範囲を表3に示す。

表3より、本解析による地盤反力係数は、寝屋川で 100000kN/m³、久宝寺で 20000 ~ 100000kN/m³ 程度である。しかし、表2に示すように従来の方法で N 値から求められた地盤反力係数はどちらも 10000kN/m³ である。本解析による地盤反力係数は、従来の方法による地盤反力係数の 2 ~ 10 倍であり、今後さらに多くの断面について解析を行い、本モデルでの地盤反力係数について検証をする必要がある。

6.まとめ

従来のはり - ばねモデルを改良したモデルで、大深度地下シールドトンネル覆工に作用する土水圧と、それとともなって発生する変位、曲げモーメント、軸力の評価を行い、本モデルが計測値を表現できることを確認した。以下に得られた結論を述べる。

地盤変位と土圧係数の関係を双曲線関数で与えることにより、地盤の自立性を表現できるモデルを開発した。さらに、地盤反力を規定する地盤反力係数のパラメータスタディを行い、大深度地盤条件における、その影響を確認した。

強制変位を地盤ばねに与えることにより、裏込注入の影響を表現できるモデルを開発し、その影響を確認した。

従来の設計モデルと比較し、本モデルを用いた場合、作用有効土圧、変位は小さくなる。現場計測された作用土水圧を解析値と比較することにより、本モデルの妥当性を確認した。

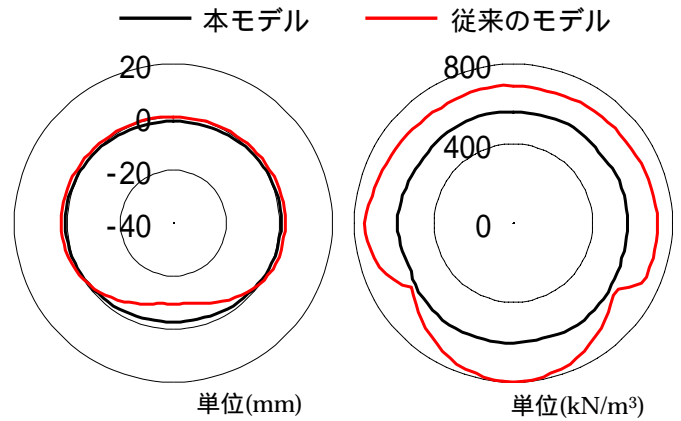


図8 変位分布図 図9 作用土水圧分布図

表3 裏込注入率

計測断面	地盤反力係数(kN/m ³)			
	10000	20000	50000	100000 以上
寝屋川北部			80 ~ 85	90 ~ 95
久宝寺		90 ~ 95	92 ~ 98	95 ~ 100

参考文献

- 1) 土木学会 トンネル工学委員会 技術小委員会 トンネル荷重検討部会：都示 NATN とシールド工法の境界領域、土木学会、2003.10
- 2) 小嶋清伍・橋本正・長屋淳一：地下河川トンネルにおける覆工作用土圧の現場計測，トンネル工学研究論文・報告集第 12 巻報告(66)，2002.11
- 3) 岡崎麻里・杉本光隆・Aphichat Sramoom：大深度地下シールドトンネル用セグメントの設計方法に関する一考察、土木学会年次学術講演会講演概要集、/433、2003.9
- 4) 鉄道総合技術研究所：シールドトンネル設計標準に関する手引き，鉄道総合技術研究所，2001.3