

地下水位回復地区における地下鉄トンネル変形に関する検討

長岡工業高等専門学校 学生会員 ○岩渕崇宏
 長岡工業高等専門学校 学生会員 荒川 涼
 長岡工業高等専門学校 正会員 岩波 基

1. はじめに

東京地下鉄株式会社が地下水位回復時期に粘性土地盤内に建設された地下鉄トンネルの変位を詳細に分析したところ、横つぶれすることが明らかになった¹⁾。この挙動を弾粘塑性 FEM 解析によって再現することを試みたが、解析結果は計測結果とは異なり、縦つぶれする結果となった。そこで、本検討では、地下水位回復時の地盤とトンネルの変形挙動により、地盤とトンネルが剥離する可能性があることに着目した。そして、セグメント外面と地山間に生じる間隙に作用する水圧を解析結果から推定した。そして、間隙で生じる水圧と、地盤の変形により生じるトンネルへの影響を荷重に換算し、はりばねモデルを用い構造解析を行い、トンネルの変形を算出し直した。その結果、トンネルは実挙動と同様に横つぶれすることから、地下水位回復時期に粘性土地盤内に建設された地下鉄トンネルの変位の主な要因は、地盤とセグメントの間隙に生じた水圧である可能性が高いことを明らかにした。

2. 検討対象

検討対象は、1986年に建設された、東京都江東区に位置する地下鉄トンネルの一断面とした。トンネルの内空変位量の計測は1997年に開始された。2010年時には、トンネルの計測開始後の鉛直内空変位量が-0.8mmで水平内空変位量が1.5mmであることから、横つぶれしていることがわかる。また、この地区では地下水位の観測を1954年に、地表面変動量の観測を1966年に開始した。観測結果を図-1に示す。地下水位は1950年代から大規模な汲み上げが行われ、それに伴い広域で地盤沈下が生じ問題となった。その後、1964年に地下水の利用が規制され、地下水位は回復し地盤沈下は沈静化した。今度は地下水位が大きく回復したことにより、数cmの地盤隆起が発生し、この地区の地下鉄トンネルが変形を生じているため、今後の長期的な影響の可能性が懸念されている。

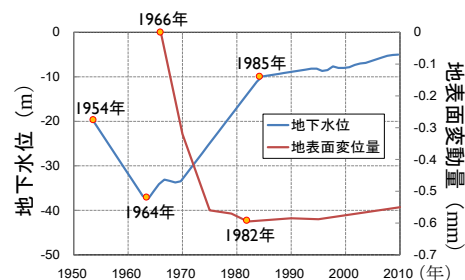


図-1 地下水位の変動と地表面変動量

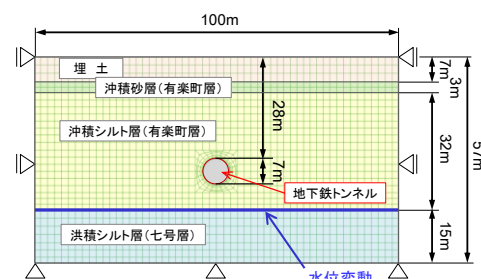


図-2 解析モデル

表-1 弾性地盤の物性値

地層区分	埋土	沖積砂層
単位体積重量(kN/m ³)	17.0	17.7
ヤング率(kN/m ²)	30000	20216
ポアソン比	0.37	0.35

表-2 弾粘塑性地盤の物性値

地層区分	沖積シルト層	洪積シルト層
単位体積重量(kN/m ³)	15.2	16.5
ダイレイタンス係数	0.094	0.076
非可逆比	0.95	0.90
限界応力比	1.2	1.2
ポアソン比	0.33	0.33
静止土圧係数	0.5	0.5
初期間隙比	2.18	1.53
圧縮指数	0.378	0.256
透水係数(m/sec)	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-9}

3. トンネル建設位置のトンネルと地盤の変位量の算定

弾粘塑性 FEM 解析によって、地下鉄トンネル建設位置のトンネル覆工と地盤の変位挙動の違いを確認するために、建設位置にトンネル覆工がある場合と、無い場合のトンネル空洞の内空変位量を算出し比較した。

1) 解析条件

解析ソフトには数値解析ソフト D'sNAP を使用した。解析モデルを図-2に示す。解析領域は水平方向に100m、鉛直方向に57mとした。モデルの両端は水平方向のみ固定し、下端は鉛直、水平方向とも固定した。対象位置の地層構成は地表面から埋土、沖積砂層、沖積シルト層、洪積シルト層からなる。埋土と沖積砂層は弾性材料とし、沖積シルト層と洪積シルト層は弾粘塑性材料とし、関口・太田弾粘塑性モデルを適用した。各地層の物性値を表-1、2に示す。地盤の材料物性値は東京地下鉄の地質調査報告書の値を用いた。沖積シルト層内に位置するトンネルはビーム材料としてモデル化した。トンネルキーワード シールドトンネル、地下水位、地盤隆起

ル覆工の材料物性値を表-3に示す。沖積シルト層の下端部の水頭を地下水位の変動に従って変化させた。水位変動に用いた時間－水位関係を図-3に示す。東京東部では、大正期から地下水の利用が活発になったことから地下水位の低下は1913年から始まったと仮定した。

2) 解析ケース

ケース1は、トンネル覆工の変位を算出するために、1986年のトンネル建設時にトンネル建設位置にビーム材料を追加し、トンネル内部を掘削する解析を行った。ケース2は、トンネル建設位置の地盤の変位を算出するために1986年時にビーム材料を追加せずに、トンネル内部を掘削する解析を行った。トンネル建設位置は両ケースとも1986年以降は非排水な境界条件とした。

3) 解析結果

両解析ケースの、1986年の変位量を基準として0とした時の2010年時のトンネル空洞部の鉛直内空変位量と水平内空変位量の解析結果を表-4に示す。両ケースともトンネル空洞は鉛直方向に伸び、水平方向に縮むことから、実挙動とは異なり、縦つぶれる結果となったが、ケース1に比べケース2の鉛直内空変位量が約5倍大きな値となった。この結果より、トンネル建設位置の地盤がトンネル覆工よりも大きく縦つぶれることから、実際には、トンネル上下端付近で間隙が生じることが考えられる。そして、この間隙に地下水が入り込むことで、トンネル上下端付近で水圧が作用することが予想される。

4. トンネル周辺の間隙水圧の確認

トンネル周辺の間隙水圧は先ほどのケース2の解析により求めた。解析は1913年から2010年までとしたが、ここでは、水圧によるトンネルの内空変位量を計測値と比較するために、計測が開始された1997年から2010年までの水圧の増加量を求めた。

5. はり-ばねモデルによる構造解析

ここでは、本検討対象のトンネルには、トンネル上下端付近の間隙で生じる水圧と、トンネル側方の地盤が地下水位の回復に伴い縦つぶれて内側に入り込む水平方向の地盤変位を荷重に換算して作用させた。そして、これらをはり-ばねモデルに荷重として作用させ、トンネルの変位を算出した。なお、水平方向の地盤変位を荷重に換算する際は、地盤反力係数を 2.5MN/m^3 とし、地盤が覆工に与える荷重を算定した。はり-ばねモデルに作用させる1997年から2010年までに増加した分の水圧と地盤変位の換算荷重を図-4に示す。

はり-ばねモデルによるトンネルの内空変位量の解析結果と計測値を表-5に示す。解析値は、鉛直内空変位量、水平内空変位量ともに計測値より大きな値となったが、トンネルは実挙動同様に横つぶれる結果となった。

6. まとめ

以上の結果より、地下水位回復時期に粘性土地盤内に建設された地下鉄トンネルが横つぶれる、主な要因の一つは、トンネル上下端付近の間隙で生じる水圧である可能性が高いことを明らかにした。

参考文献

- 1) 関ら：地下水位の回復に伴う地盤隆起現象と地下鉄への影響(その1)-地盤隆起現象と地下鉄構造物の測定結果-, 第48回地盤工学研究発表会, pp1479-1480, 2013.7

表-3 トンネルの物性値

ヤング率(kN/m^2)	3.9×10^7
断面二次モーメント(m^4/m)	6.3×10^{-3}
断面積(m^2)	0.48

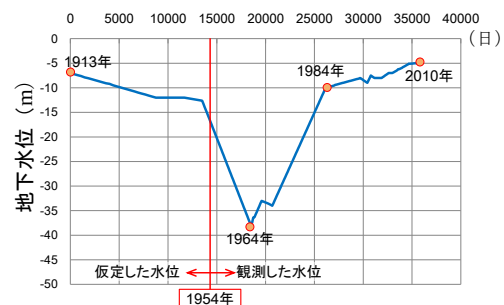


図-3 解析に用いた時間－水位関係

表-4 2010年時の内空変位量の比較

(2010年)	計測値	解析値	
		ケース1	ケース2
鉛直内空変位量(mm)	-0.8	0.3	1.5
水平内空変位量(mm)	1.5	-0.3	-1.4

※正：伸び 負：縮み

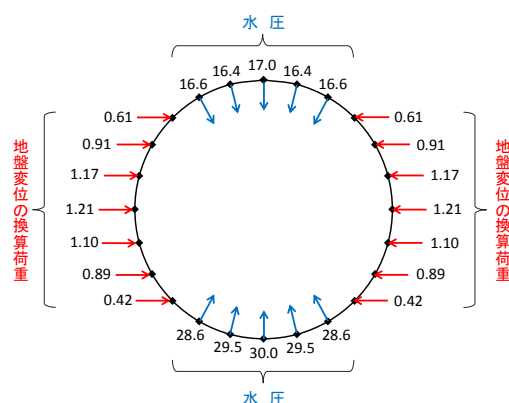


図-4 作用させる水圧と地盤変位の換算荷重

表-5 内空変位量の比較

(2010年)	解析値	計測値
鉛直内空変位量(mm)	-4.6	-0.8
水平内空変位量(mm)	4.2	1.5