# 供用開始後30年以上経過した鉄道用シールドトンネルの経時変動に関する研究

中島 純也1・池本 宏文2・本田 諭3

<sup>1</sup>正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所(〒151-8512 東京都渋谷区代々木二丁目 2番 6 号) E-mail: ju-nakajima@jreast.co.jp

<sup>2</sup>正会員 東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所(〒151-8512 東京都渋谷区代々木二丁目 2 番 6 号) E-mail: ikemoto@jreast.co.jp

<sup>3</sup>正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター(〒163-0231 東京都新宿区西新宿二丁目 6 番 1 号) E-mail: hondas@jreast.co.jp.

シールドトンネルでは,覆工に作用する土圧や発生断面力を長期にわたり計測した事例は少なく,計測値と設計に用いる荷重を比較したものは僅かである.本研究では供用後 37 年を経過した第 2 上野トンネルに作用する土圧,水圧,およびセグメントの鉄筋のひずみを計測し,設計に用いる荷重との比較検証を行った.計測結果から,覆工に作用する土圧,水圧に上昇が見られたが,その差分である有効土圧の変動は小さく,地下水位の上昇に伴い土圧が増加したものと推定した.また,計測値から求めた鉛直有効土圧は,Terzaghiの緩み土圧式より算定したものと同程度であること,および,鉄筋のひずみ計測値から求めた一次覆工の発生曲げモーメントは,鉄道構造物等設計標準に示される土圧,水圧,地盤反力をもとに全周ばねモデルにより解析したものと整合性が高いことを確認した.

Key Words: Shield tunnel, Long term measurement, Segment, Earth pressure, Water pressure

# 1. はじめに

シールドトンネルの設計では、覆工に作用する土圧や水圧などの荷重を適切に評価することが重要であり、このためには、実際のシールドトンネルにおいて、長期にわたり計測を行うことが必要であると考えている。しかしながら、これまでに供用中のトンネルにおいて、覆工に作用する荷重や発生断面力を長期にわたって計測した実績は少なく、計測値と設計で用いる荷重を比較した事例は僅かであるり。

東北新幹線の第 2 上野トンネルは、1985 年 3 月に供用開始したシールドトンネルであるが、施工時にセグメントに土圧計、水圧計、および鉄筋のひずみゲージを設置し、供用開始後も確認できるよう存置されている。土圧などの計測は、これまでに施工中(1981 年 12 月から1986年3月) $^{20}$ だけではなく、供用開始後の1986年3月、1992年1月 $^{3,4}$ 、1997年1月 $^{5}$ に実施してきた。この度、計測開始から37年が経過した時点 $^{5}$ (2018年10月)において計測を実施し、設計に用いる荷重との比較検証を行ったことから、その内容を報告する。

# 2. トンネルの概要と地質構成

# (1) トンネル概要

東海道新幹線,山陽新幹線に続く,第三の新幹線として 1971 年に東北新幹線計画が決定された. 当時は東北新幹線の完成により,東北地方の行動圏の拡大,および国土の有効利用が進み,東北地方の生活領域が拡大されることが大いに期待されていた.このうち,上野駅周辺一帯の地表には,すでに道路,民地建物,在来線などが存在していたことから,施工性,用地の確保を考慮し,地下空間にシールド工法により,複線大断面円形トンネルが採用された.

第2上野トンネルは、1981年2月に掘削に着手し、1985年3月に供用開始した.施工には、圧気併用の切羽開放型の半機械掘り式シールドが採用され、施工延長は1,245mである。トンネルの断面は図-1に示すような円形の複線構造であり、セグメント外径12.66m、内径11.56mとなっている。また、セグメントは、平板型RCセグメントを使用し、継手はピース間がピン構造、リング間はピンおよびホゾ構造となっている。一次覆工(セグメント)の厚さは550mm、二次覆工の厚さは300mmである。

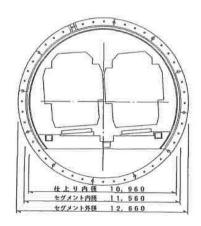


図-1 トンネル構造図

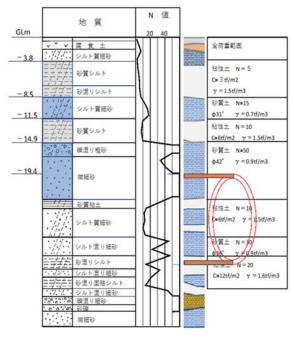


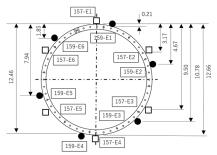
図-2 地質概要

#### (2) 地質構成

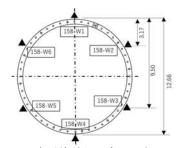
第2上野トンネルは、山の手台地と東京低地の境界付近に位置し、洪積層の東京層(砂質土層、粘性土層)内に構築されており、土被りは約19mである。図-2は計測箇所の地質柱状図とセグメント設計に用いた地盤物性値を示したものである。トンネル断面における地質は、砂質土と粘性土の互層になっており、設計用の土質区分は、上部 1/3 断面が東京層の砂質土、中央 1/3 断面が東京層の粘性土、下部の 1/3 断面は東京層の砂質土である。

# (3) 対象地域の地下水位の変動

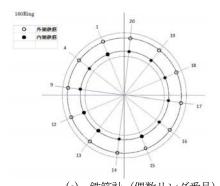
第2上野トンネルが属する東京23区部では、1971年 以降、工業用水法による規制強化が行われ、揚水量が大幅に減少した。その結果、地下水位は規制直後から1983 年頃までに急激に上昇して、その後は緩やかに上昇し、 ここ数年はほぼ横ばいである。



(a) 土圧計 (リング No.157・159)



(b) 水圧計 (リング No.158)



(c) 鉄筋計(偶数リング番号)

図-3 計測器配置図

# 3. 計測概要と計測結果

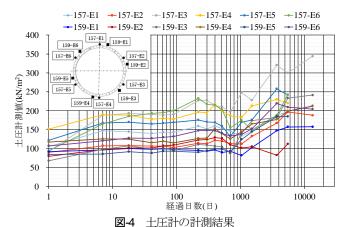
## (1) 計測概要

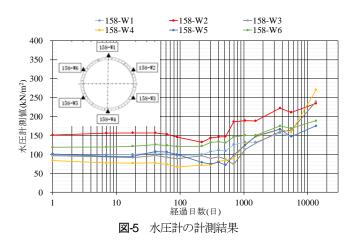
計測は、セグメントに土圧計、水圧計、およびセグメントの鉄筋にひずみゲージを設置(以下、鉄筋計と称する)して実施した. 図-3に代表断面における計測器の配置図を示す. 土圧計は、φ60cm の差動トランス式のものを使用し、セグメント2リング(リングNo.157、159)を計測対象として、1リング当たり6個設置した. 水圧計は、ひずみゲージ式のものを使用し、1リング(リングNo.158)を計測対象として6個の計測器を設置している. また、鉄筋計は7リングを計測対象として、ひずみの値から曲げモーメント、軸力を求めるため、セグメントの内側、外側の鉄筋に合計178個に設置している. 鉄筋計は、セグメントリングの番号が偶数番号と奇数番号で千鳥配置になっている.

表-1 に計測時期, および経過日数を示す. トンネル施 工中の計測は, 1981 年 12 月から 1986 年 3 月の期間にお

表-1 計測時期·経過日数

	計測年月	経過日数
自動計測開始	1981年12月	1
供用開始	1985年3月	1183
自動計測終了	1986年3月	1546
第1回手動計測	1986年3月	1550
第2回手動計測	1992年1月	3680
第3回手動計測(前回)	1997年1月	5514
第4回手動計測(今回)	2018年10月	13442





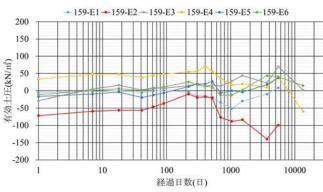


図-6 有効土圧の経時変化

いて実施し、計測値を自動計測により収集した. その後、 1986年3月,1992年1月,1997年1月(前回計測と称す る) に計測装置を接続し、手動計測により実施した。今 回は, 前回計測から 21年 (13442日) 経った 2018年 10

月(今回計測と称する)に計測を行った。

#### (2) 計測結果

#### a) 土圧計の計測結果

図4に土圧計の計測結果を示す. 今回計測では5個の 土圧計は経年劣化に伴い、異常な数値を示していたため、 正常な7個の計測値を示した.

計測開始から 500 日~1500 日間は,圧気,断気,二次 覆工等,工事に伴い計測機器の盛替え等を繰り返してお り、計測値はその影響を大きく受けるため、変化の大き なデータは除去している. 計測値は 1000 日以降から, 徐々に増大していき、前回計測(5514日)以降は、それ 以前に比べて上昇量は小さくなっている.

# b) 水圧計の計測結果

図-5 は水圧計の計測結果を示したものであるが、500 日以降から徐々に増加する傾向となっている. 今回の計 測では、1個の水圧計は異常な数値を示していたため、 その計測値は除外している.

地下水位の変動と水圧の計測値との比較を行うため, 平成 29 年地盤沈下調査報告書 7をもとに、1997 年から 2018年までの地下水位の計測値を確認した。1970年から は、工業用水法による地下水位の規制基準の強化などが 実施されて、23 区部全体の揚水量は減少している。低 地の地下水位は 1983 年頃までに大幅に上昇したが、そ の後は現在まで、緩やかな上昇に留まっている。第2上 野トンネルの近傍には観測井が設けられていないため, 平成29年地盤沈下調査報告書をもとに23区部の12地点 における観測井のデータを使用して確認した. その結果, 1997 年から 2018 年の地下水位の上昇量は、平均して 5.4mであった.

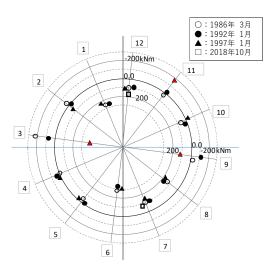
図-5から、同期間における水圧の増分量を水位に換算 すると約 5.7m (水圧の平均値:55.9kN/m²) であり,地 下水位の上昇量と同程度となっている. そのため、水圧 の計測値の増加は、地下水の上昇によるものであると考 えられる.

#### c) 有効十圧

土圧計、水圧計の計測値をもとに、各々の差分から有 効土圧を(土圧計測値-水圧計測値)として求め、その 経時変化を整理した. 図-6 には, リング No.157 のもの の結果を示す. 計測 1000 日以降では, 有効土圧は一時 的に低下するものの、全体的に変動は小さく安定してい る. 前述のように水圧計の増加分は、地下水位の増加に 伴うものと考えられるため、土圧計の計測値の増加は、 地下水位の上昇によるものであると推定される. なお、 157-E2 の有効土圧はマイナスの値となっているが、これ は土圧の計測の初期値の影響によるものと考えられる.

#### d)鉄筋計の計測結果

鉄筋計の計測は、今回の鉄筋計の計測では、前回と比



(a) 偶数番号のリング

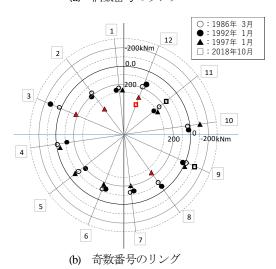


図-7 一次覆工の発生曲げモーメント分布

べて多くの測点で測定不能,あるいは連続性が認められない測点が発生した.これは,ひずみゲージの経年劣化によるものであると考えられる.また,正常な計測データが得られた鉄筋計であっても,同位置において内縁,外縁の組合せでデータが取得できたものは5組であった.

鉄筋計の計測結果から一次覆工に発生する曲げモーメントを求めた。曲げモーメントはセグメントの同位置での内縁、外縁の組合わせでデータが取得できたものに対して、偶数番号、奇数番号のセグメントリングごとに平均化して整理した。曲げモーメントの算定にあたっては、コンクリートの弾性係数は、セグメントコンクリートの実強度から求めた  $Ec=35\times10^7 \text{kN/m}^2$  を用いた。 図-7 は偶数番号、奇数番号のセグメントにおける計測位置での曲げモーメントを示したものであり、供用開始後の 1986年3月、1992年1月、1997年1月、2018年10月のものを示した。なお、図中の赤色の点は時系列として連続性がなく信頼性にかけると判断したものを示した.

今回計測の計測点は少ないものの, 前回計測までの傾向と比べて, 曲げモーメントの値が大きな変化する傾向

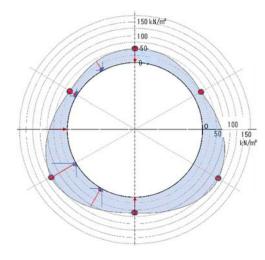


図-8 有効土圧分布

は見られず安定しているものと考えられる. また,曲げモーメント分布は横に楕円状の分布となっており,数値は全体的に正の曲げモーメントとなっている.

# 4. 鉛直土圧の理論式と計測値の比較

有効土圧の計測値をもとに、全計測点でデータのある前回計測の値をもとに鉛直有効土圧と理論式との比較を行った。図-8は有効土圧の計測値の分布を示したものであり、同じ深度の計測値に対して、各々の値を平均して示している。トンネル天端に作用する鉛直有効土圧は49.0kN/m²となっている。

理論式は、鉄道構造物等設計標準・同解説シールドトンネル®(以下、設計標準と称する)に示されるTerzaghiの緩み土圧式を用いることとし、算定には図-2に示す地盤物性値を用いた。Terzaghiの緩み土圧式より求めた鉛直土圧は50.3kN/m²であり、概ね計測値と同程度の値となっていることから、トンネルには緩み土圧相当の荷重が作用しているものと推定される。

# 5. 設計値と計測値の比較

# (1) 解析概要

覆工に作用する土圧、水圧、および覆工に発生する曲 げモーメントの計測値と設計値の比較検証を行うため、 梁ばねモデルによる構造解析を実施した. 荷重の設定に あたっては、設計標準に基づき行なった. また、土圧、 水圧は、計測結果をもとに、土水分離により有効土圧と 水圧を別々に作用させることとした.

有効土圧については、Terzaghi の緩み土圧式をもとに  $\mathbf{Z}$ -9のように設定し、側方土圧の計算には側方土圧係数  $\lambda$ =0.5 を用いた。また、水圧は、 $\mathbf{Z}$ -10 に示すようにトンネル天端の水頭に静水圧を付加したものを全断面に作

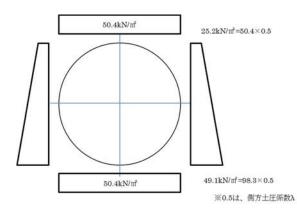


図-9 解析に用いた土圧モデル

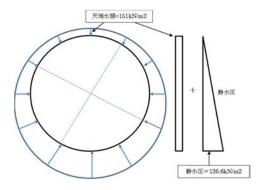


図-10 解析に用いた水圧モデル

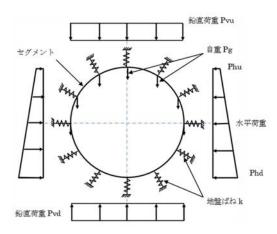


図-11 完全剛性一様リングモデル

用させるものとした.

構造解析モデルは、設計条件の設定において不確定要素の少ない、**図-11** に示す完全剛性一様リングモデルを用いることとした。なお、セグメントリングの剛性の評価は、シールドトンネル設計施工指針(案) $^9$ をもとに継手の曲げ剛性の有効率 $_{\eta}$ =0.6、曲げモーメントの割増率 $_{\zeta}$ =0.2と設定した。

また、地盤反力については、設計標準をもとにトンネル半径方向に作用する地盤ばねにより設定した。地盤反力係数は、設計標準に示される裏込め注入の硬化後を用いることとし、非常に密な砂質土( $30 \le N < 50$ )の中央

表-2 構造解析条件

項目	数値	
セグメント断面積 A	0.55m <sup>2</sup>	
セグメント断面二次モーメント I	0.002773m <sup>4</sup>	
セグメント弾性係数 E <sub>0</sub>	3.5×10 <sup>7</sup> kN/m <sup>2</sup>	
地盤ばね k	1.2×10 <sup>4</sup> kN/m <sup>3</sup>	
自重 P <sub>g</sub>	13.75kN/m	
側方土圧係数 λ	0.5	
トンネル中心径 Dc	12.11m	

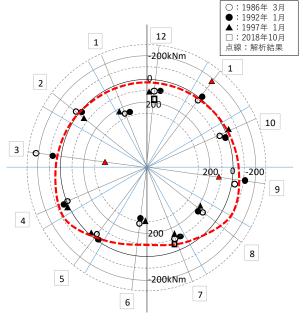


図-12 解析結果

値をトンネル半径 (6.055m) により除して 120,000kN/m³ と設定した. 表-2 に構造解析条件を示す. なお,本解析では荷重に対しては一次覆工により支持していることと位置付けて,一次覆工の断面における曲げモーメントを計算した.

#### (2) 解析結果と評価

図-12 に解析から求まる曲げモーメント分布を示す. 同図には、偶数番号のセグメントリングの計測結果を併記している.解析値は、全体的に計測値と同程度の数値となり、全周ばねモデルにより解析したものと整合性が高いことが確認できる.

# 6. まとめ

本研究では供用後 37 年を経過した第 2 上野トンネルに作用する土圧、水圧、およびセグメントの鉄筋のひずみを計測し、設計に用いる荷重との比較検証を実施した. 本研究により得られた知見は以下の通りである.

・計測結果から、土圧計、水圧計の計測値はともに上昇

- しているが、水圧の計測値の増加は、地下水の上昇に よるものであると推定した.
- . 計測結果より、有効土圧の経時変化は全体的に小さいことから、有効土圧は安定していることを確認した. また、土圧計の計測値の増加は、地下水位の上昇によるものであると推定した.
- ・計測値から得られた鉛直有効土圧は、Terzaghi の緩み 土圧式より算定したものと同程度であることを確認し た.
- ・鉄筋のひずみ計測値から求めた覆工の発生曲げモーメントは、設計標準に示される土圧、水圧、地盤反力をもとに全周ばねモデルにより解析したものと整合性が高いことを確認した.

今回実施した,供用後長期間が経ったトンネルの計測 結果および設計標準との比較が,今後のシールドトンネルの覆工設計の一助になれば幸いである.

#### 参考文献

矢萩秀一,藤木育雄,大石敬司,斉藤正幸,新井孝弘:洪積地盤における鉄道シールドトンネルの長期現場計測,トンネル工学論文集,第14巻,pp.139-149,2004.

- 2) 飯田廣臣,清水満,石井恒生:第2上野トンネルに おける土圧および鉄筋応力度の測定結果,第39回土 木学会年次学術講演会,Vol.40,pp.357-358,1985.
- 3) 清水満,新堀敏彦,井上寿男,細川泰明,加藤教吉:供用開始後の鉄道用シールドトンネルにおけるセグメント測定,第 27 回土質工学研究発表会,pp.2089-2092, 1992.
- (4) 清水満,中根理,新堀敏彦,加藤教吉:供用開始後の鉄道用シールドトンネルセグメントの応力測定(2),第48回土木学会年次学術講演会,Vol.47,pp.68-69,1992.
- 5) 清水満,中根理,新堀敏彦,加藤教吉:供用開始後の鉄道用シールドトンネルにおけるセグメント測定(2),第32回地盤工学研究発表会,pp.2039-2040,1997.
- 6) 本田論, 小泉秀之, 堤直之, 清水満, 加藤教吉:供 用開始後30年以上経過した鉄道用シールドトンネル におけるセグメント測定, 第74回土木学会年次学術 講演会, Ⅲ-24, 2019.
- 7) 東京都土木技術支援・人材育成センター平成29年地盤沈下調査報告書,2018.7.
- 8) 国土交通省鉄道局監修,鉄道総合技術研究所編:鉄 道構造物設計標準・同解説 シールドトンネル,丸 善,1997.
- 9) 日本鉄道施設協会:シールドトンネル設計施工指針 (案),1999.

# STUDY ON TEMPORAL CHANGE OF RAILWAYS SHIELD TUNNEL USING FOR OVER 30 YEARS

## Junya NAKAJIMA, Hirofumi IKEMOTO and Satoshi HONDA

When designing a shield tunnel, it is important to determine the external force acting on the tunnel appropriately. However, there are few examples of measuring earth pressure and cross-sectional force of segment over a long period of time. There is very little comparison between the load used in the design and the actual measured values. We measured earth pressure, water pressure, and reinforcing bar strain applied to a tunnel used for 37 years, and compared the load used in the design with the measured load.

From the measurement results, it was estimated that the increase in earth pressure was due to the increase accompanying the increase in groundwater level. It was confirmed that the vertical earth pressure obtained from the measured values was similar to that of Terzaghi's loosening earth pressure.