

軟弱地盤でのシールドトンネル掘進に 伴う周辺地盤の変形について

Ground behavior accompanying construction of shield tunnels in soft ground

藤木育雄^{*}・横田三則^{*}・米島賢二^{*}・村田基代彦^{**}

Ikuo FUJIKI, Mitunori YOKOTA, Kenji Yoneshima, Kiyohiko MURATA

Tunneling work in urban areas requires not only the safety of the tunnel itself against stress, but also sufficient safety of the ground influenced by excavation. There is a growing demand, therefore, for highly reliable prediction of influences on the ground around the tunnel prior to excavation.

By using both field measurement and theoretical approaches, Teito Rapid Transit Authority developed a method for estimating the deformation of the ground around the tunnel during slurry shield excavation in hard ground, and now uses that almost established method in actual tunneling work (Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers, No.397/V1-9, September 1988). However, for soft ground where deformation is greater, there is not yet any established method for estimating ground deformation.

In view of these circumstances, this paper proposes a method for estimating the deformation of soft ground during shield tunneling.

Keywords: Ground behavior, analysis method of predicting the settlement, shield tunnels, soft ground

§ 1. はじめに

東京のような比較的軟弱な地盤上に発展している大都市において、地下鉄道、地下道路、幹線上下水道などの地下構造物を建設する場合には、地下空間の輻輳化に伴って、これらの新設構造物は、ますます深層化する傾向にある。深層化が進むにつれて、地下構造物に作用する土圧や水圧も大きくなるが、こうした外荷重に抵抗するため、また経済性の観点から、シールド工法が標準工法となっている。

シールド工法が都市トンネルの標準工法となった大きな理由がもう一つある。それはシールド工法が、他のトンネル工法に比較して、既設構造物への影響や周辺地盤の沈下を小さくできることである。

シールドトンネル掘進に伴う地盤変形に関する研究は、各方面で数多くなされているが、営団でも現場での測定とその解析を継続的に行なっており、既に硬質地盤に対する研究は発表している。¹⁾

ここでは、泥水式シールドを採用した場合の軟弱地盤の挙動に関して、現場で得られた実測値をもとにその発生機構を明らかにし、これに基づいた変形の予測方法について考察するものである。

* 正会員 帝都高速道路交通営団 建設本部

** 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 トンネル部

§ 2. 計測の概要と計測結果

計測を行なった現場は、有楽町線辰巳三工区と7号線（南北線）神谷工区の2現場で、いずれも軟弱な沖積地盤であり、シールドトンネルは複線断面でシールド外径が10.0m、セグメントの厚さが55cmの中子型（改良型）である。

（1）有楽町線辰巳三工区

この現場は、シールド全体が厚い軟弱粘性土地盤の中に位置しており、また周辺には首都高速道路の橋脚が近接している。このような状況を踏まえて、この現場での泥水圧は、地盤変形を最小にすることを目的として、硬質地盤での実績から静止側圧と余裕圧（ $0.2 \sim 0.3 \text{ kg f / cm}^2$ ）の和とした。ここでは、地盤の変形（鉛直と水平）と間隙水圧の測定を行った。

地盤変形の測定結果は、解析結果と合わせて図-8に示した。泥水圧を少し高く設定したために、切羽前方で隆起がみられた。

（2）7号線神谷工区

この現場では、軟弱粘性土地盤の下方にシールドは位置している。シールドに近接して、 $\phi = 3000 \text{ mm}$ の工業用水道が存在し、許容される地盤沈下（前日と当日の差）は15mmであった。この現場での泥水圧は、有楽町線辰巳工区の測定結果を踏まえて、少し低い値とし、切羽前方の地盤に隆起を生じさせない圧力とした。

この現場では、地盤変形と間隙水圧ばかりでなく、地盤変形に関係深いと考えられる次のような測定も行なった。以下に、その測定結果とあわせて述べる。

①面板圧の測定：切羽を押す力は、図-5に示すように泥水圧と面板圧の和であると考えられるので、実際の面板圧を知ることが目的として、面板の支点の反力を測定した。測定の結果、面板が切羽を押す力は500tf程度であることが分かった。

②テールボイトでの裏込注入圧力：この現場での裏込めは、可塑状固結タイプで同時注入方式を採用したが、実際にテールボイトで作用している圧力を知ることが目的として、セグメントの外側に圧力計を設置して圧力を測定した。テールボイト内の圧力は相当変動していることが分かった（図-3参照）。

③シールドテール部への泥水の流入：テールボイトへ泥水が流入していることが考えられるので、その状況を見るためにシールドのテール部に手を加えて、地盤が見えるようにした。この観測の結果、泥水の流入はほとんどの場所で観測できなかった。

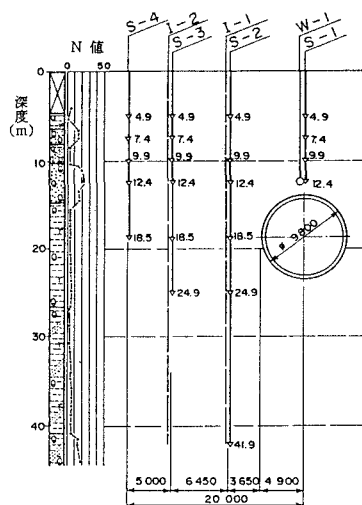


図-1 測定計器の配置図
有楽町線辰巳三工区

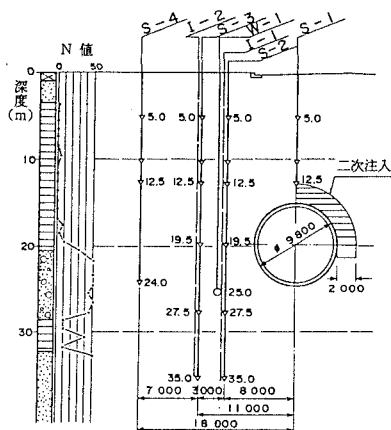


図-2 測定計器の配置図
7号線神谷工区

§ 3 . 地盤の応力解放と地盤変形の発生機構

シールドと地盤との位置関係において地盤の応力解放の発生原因を考えると、次のようになる(図-4参照)。

- ①切羽部における応力解放
- ②シールド周囲における応力解放
- ③テールボイド部における応力解放
- ④セグメントリング部における応力解放

(1) 切羽部における応力解放

泥水式シールドを採用した場合の切羽での応力状態を図-5に示した。すなわち、地盤からは土圧と水圧が作用し、これに対しシールド側からは泥水圧とシールドの面板圧が作用している。

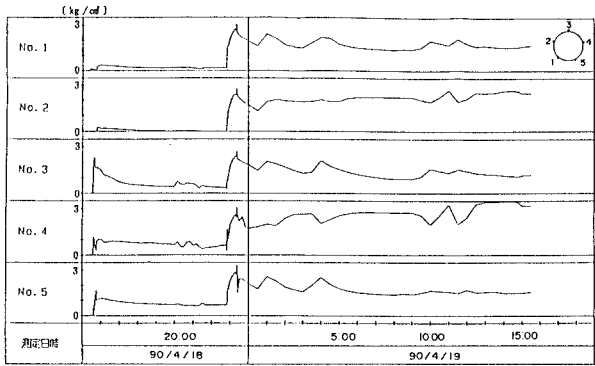


図-3 テールボイドの圧力の測定値

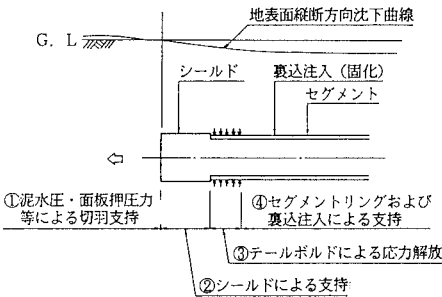


図-4 地盤応力の支持機構

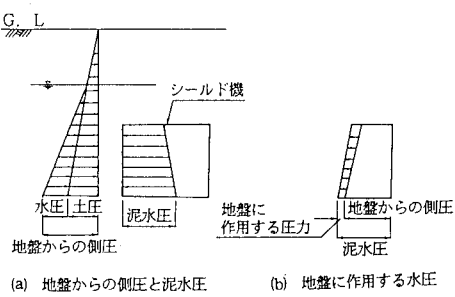


図-5 切羽での圧力のバランス

切羽での応力解放を防止するためには、泥水圧の合力とシールドの面板が地盤を押し付ける力の和を、地盤から作用する静止土圧の合力と間隙水圧の合力の和に等しくする必要がある。すなわち、泥水圧を次のように決めることとなる。

$$P_{f0} + P_{m0} = P_{s0} + P_{u0} + \Delta P \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 P_{f0} はシールドの前面に作用する泥水圧の合力、 P_{m0} はシールドの面板が地盤を押し付ける力、 P_{s0} は地盤の静止側圧の合力、 P_{u0} は地盤の間隙水圧の合力、 ΔP はシールド掘進時の余裕圧である。ただし、粘性土地盤においては土圧と水圧に分けることなく、 P_{s0} と P_{u0} の和を側圧として1項目で扱う。

(2) シールド周囲における応力解放

この部分の地盤は、シールドのスキンプレート及びリングガータにより支持されているので、大きな応力解放はない。

(3) テールボイド部における応力解放

シールド工法では、テール内でセグメントを組み立てたのち、シールドを前進させるために、セグメントで作られた一次覆工の外周と地盤の間には空隙が生じる。この報告で使用したシールド機の場合、この空隙は理論的には100mmである。この空隙には裏込材を注入して、地盤が緩んでこの空隙をうめることを防止する。しかし、この裏込材は注入してただちに強度を発揮させることができないので、この部分での応力解放は避けることができない。この部分での応力解放は裏込材が未固結な状態で生じるので、テールボイド内の圧力を

考えた次式で与えられる。

$$[\text{解放応力}] = [\text{原地中応力}] - [\text{テールボイド内の圧力}] \cdots \cdots \cdots (2)$$

テールボイド内の圧力は、裏込注入の圧力か泥水圧のいずれかを採用することが考えられるが、いずれにしても原地盤の地中応力は鉛直と水平では異っているのに対して、テールボイド内の圧力はほぼ等圧であるので、仮りに水平方向の原地中応力とテールボイド内の圧力を等しくして、応力解放を生じさせるとしても、鉛直方向では大きな応力解放が生じる。この結果地盤は沈下する。

(4) セグメントリング部における応力解放

この部分はセグメント周辺に裏込材が充填され、周辺地盤と密着している。また、裏込材は周辺地盤と同等以上の強度を有している。従って、この部分での応力解放は、主としてセグメントリングの変形によることとなる。しかし、このセグメントの変形も、裏込材の充填が完全であれば非常に小さいものと考えられる。したがって、この部分の応力解放は、無視できる程度と考える。

(5) 地盤変形の発生機構

粘性土地盤の変形は、応力解放による変形と乱れに基づく圧密沈下によると考えられている。^{2) 3)} 応力解放について上記のような考え方に立つと、切羽部、シールド周面、セグメントリング部の3箇所については、地盤の応力解放の主たる要因とはならないことが分かる。したがって、応力解放による地盤変形の主たる要因は、テールボイド部での応力解放といえる。また圧密による地盤沈下もその原因が乱れにあることから、テールボイド部での応力解放に基づく地盤のひずみが主たる要因と考えられる。

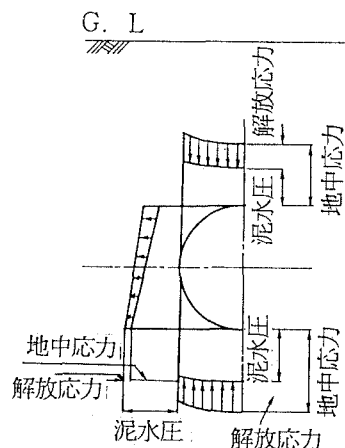


図-6 地中応力とテールボイド内の圧力

§ 4. 地盤変形の予測方法

泥水式シールド施工による地盤変形的主要因は、上記ようにテールボイド部での応力解放であることに着目して、地盤変形の予測方法を以下に述べる。なお、ここに示す予測方法は、文献1)に示された硬質地盤に対する予測方法を軟弱粘性土地盤に適用できるように、拡張したものである。

(1) 予測方法の基本的な考え方

①予測に使用する検討断面は、テールボイド部横断方向断面とし、有限要素法で二次元平面ひずみモデルにより解析を行なう。

②地盤は弾性体として取り扱う。これは、泥水式シールドを採用する場合、地盤に与える影響が比較的小さく、テールボイド部での応力解放によって、地盤は塑性化しないと判断したことによる。

③解析において、地盤の掘削面に作用させる荷重(計算に使用する解放応力)は、式(2)を基本として、これを三次元効果を考え得るように修正した次式により求める。

$$[\text{計算に用いる解放応力}] = [\text{補正係数}] * \{ [\text{原地中応力}] - [\text{テールボイド内の圧力}] \} \cdots \cdots \cdots (3)$$

ここに、[テールボイド内の圧力]は同時注入の場合(掘進と同時に注入する)は裏込注入圧力とする。また補正係数は、文献1)を参照して $\beta = 0.4$ とする。

④上記のテールボイド部の地盤解析結果より、せん断変形の大きさに応じて、地盤の乱れに起因する圧密

(2) FEM解析での地盤定数

弾性体としての解析では、ヤング係数とポアソン比が入力データとなるが、この入力データは以下のよう
に決める。

砂質土地盤 $E = 25 \text{ N}$ (5)

「ポアソン比」

砂質土地盤 $\nu = K_0 / (1 + K_0)$, $K_0 = 1 - \sin \phi$ (7)

粘性土地盤 $\nu = 0.45 \sim 0.48$ (8)

(3) 地盤の乱れに起因する圧密量

地盤の乱れに起因する圧密率 (α) は、森・赤木²⁾³⁾の研究を参照して、次のようにして求める。

$$\alpha = \frac{C c'}{1 + e_0} \cdot \log (k \cdot \gamma + 1) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$C_{c'} = 0,3 C_c \dots\dots\dots (10)$$

$$k = 0.33 \cdot I_{p-0.37} \cdot \lg St \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 α は乱れに起因する圧密による収縮率、 k は乱れを表わすパラメーター、 γ は地盤のせん断ひずみ、 e_0 は乱れを受ける前の粘土の初期間隙比、 C_c' は乱れを受けた粘土の再圧密領域での圧密指数、 C_c は乱れを受ける前の粘土の圧密指数、 I_p は塑性指数、 S_t は鋭敏比である。

なお、地盤のせん断ひずみ(γ)は、テールボイド部のFEM解析により得られる、シールド掘進によるせん断ひずみの増加分を考慮することとなる。

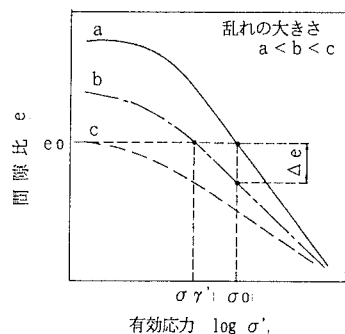


図-7 乱れに起因する
圧密曲線の変化

§ 5. 地盤変形の計算値と実測値の比較

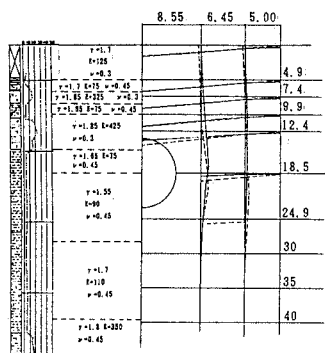
次に、現場計測によって得られた地盤沈下と、上記の計算方法によって計算される地盤沈下とを比較して、ここで提案した地盤沈下の予測方法の妥当性をみる。

対象とする現場は、先に述べたように有楽町線辰巳工区と7号線神谷工区の2現場である(表-1)。

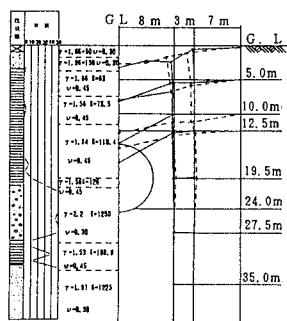
比較の結果を図-8に示したが、これによると計算値は実測値とよい一致をみており、このことより、ここで提案した地盤沈下の予測方法の有用性が確認された。

表-1 測定現場の概要

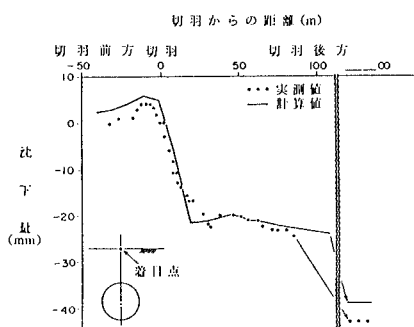
	1号機(有線電話機用) 最低レシオ	2号機(有線電話機用) 最低レシオ	7号機(無線機用) 最低レシオ
トネル外径	φ9800	φ9800	φ9800
区間	新 邑 - 新 木 場	神 宮 町 - 東 武	
測定区間	560.10 ~ 381.8	82.3 ~ 83.1	
地層・地質	砂 礫 レイ ト (N=0)	上 部 砂 礫 レイ ト (N=0~1) 下 部 砂 礫 レイ ト (N=20)	
トネル土質	13.80a	14.80a	
地下水位	_____	CL-12.80	
降水係数 (レイド中心)	2.3kg / cm ²	1.8kg / cm ²	
計測位置	レイド中心	計測位置	計測位置
地盤水位	ワイヤ式多点計下計	ワイヤ式多点計下計	
水圧測定	地中 膜 計	地中 膜 計	
地下水位 測定位置	地中 水 圧 計	地中 水 圧 計	
測定方式	即 時	間 時	



① 横断方向最終変位図

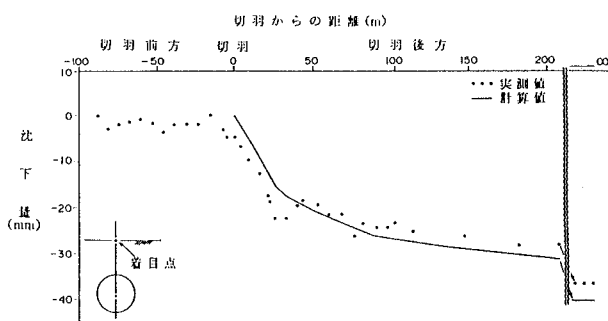


① 横断方向最終変位図



② 縦断方向沈下図

a) 辰巳シールド



② 縦断方向沈下図

b) 神谷シールド

図-8 計算値と実測値の比較

§ 6. おわりに

以上に、泥水式シールド掘進に伴う周辺地盤の沈下について、実測値に基づいてその発生原因と予測方法の考察をした。またこの予測方法の妥当性をみるために、2現場での実測値との比較も行った。

都市内での土木工事では、既設構造物への影響を事前に知っておくことは、欠くことのできない事柄であり、今後ともここで示した方法の妥当性について研究を続けるつもりである。

[参考文献]

- 1) 中山 隆・中村信義・中島 信：泥水式シールド掘進に伴う硬質地盤の変形解析について，土木学会論文報告集，第397号／VI-9，pp.133～141，1988年9月
- 2) 森 隣・赤木寛一：非排水せん断変形で生じた乱れに基づく正規圧密粘土の圧密現象，土木学会論文報告集，第335号，pp.117～125，1983年7月
- 3) 森 隣・赤木寛一：シールド工事に伴う軟弱粘性土の乱れに基づく圧密沈下，トンネルと地下，第11巻8号，pp. 15～19，1980年8月