

軟弱地盤における三連円形シールドの施工と地盤変状計測

TUNNELING WITH TRIPLE MULTIFACE SHIELD IN SOFT GROUND AND MEASUREMENT OF GROUND DEFORMATION

藤木育雄¹⁾・入江健二²⁾・末富裕二³⁾・鈴木 章悦⁴⁾
Ikko FUJIKI, Kenji IRIE, Yuji SUETOMI, Akiyoshi SUZUKI

In the extension work of the Hanzomon Line operated by Teito Rapid Transit Authority (TRTA), the triple-faced shield method was employed for construction of the platform section and storage track of Kiyozumi Shirakawa Station. This was the fourth application of the triple-faced shield method. However, it was the first experience in its application in soft ground and using reinforced concrete segments. This was also the first time in the world that a triple-faced shield with advancing side shields and an oscillating central shield was used for construction. Therefore, measurement of ground deformation was made in the initial excavation section to determine appropriate excavation control values for final excavation. This paper describes the behavior of the soft ground on the basis of the above measurement results during construction with the triple-faced shield method. In addition, immediate settlement and subsequent consolidation settlement of tail void under the action of the backfilling pressure were determined according to the analytical method proposed by TRTA for prediction of ground deformation. Confirmation was made on the applicability of this method to this work.

Key Words: triple multiface shield, ground deformation, drive control, grouting pressure, FEM analysis

1. はじめに

営団地下鉄半蔵門線(11号線)延伸工事(水天宮前～押上間, 延長6.1km)のうち清澄白河駅では停車場部及び留置線部を三連シールド工法により施工した。

三連シールド工法は今回で4例目となるが, 初めての軟弱地盤での掘削, 鉄筋コンクリートセグメントの採用や, 世界初の側部先行・中央揺動型の三連シールドによる施工となることなどから, 初期掘進区間で地盤変状計測を行い, 本掘進における適切な掘進管理値の検討を行った。

本稿では地盤変状計測結果を基に, 三連シールド工法を採用した場合の軟弱地盤の挙動について述べるとともに, 軟弱地盤の変位予測法として営団が提案した解析手法¹⁾に裏込め注入圧を考慮した手法の本工事への適用性について述べる。

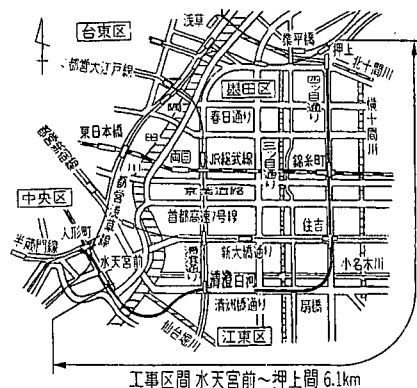


図-1 半蔵門線延伸区間平面図

- 1) フェロー 帝都高速度交通営団 建設本部
- 2) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部 設計部
- 3) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部 積算課
- 4) 正会員 帝都高速度交通営団 建設本部 11号線押上工事事務所

2. 工事概要

清澄白河駅と留置線を築造する清澄三連シールド工事(清澄工区)は全長 372.7m あり、開削工法によって築造された清澄白河停車場始端部を発進立坑とし、三連シールドにより停車場部 143.6m を掘進した後、同終端方立坑(延長 75.4m)においてシールドを移動させ、再度留置線部 229.1m の掘進を行うものである。その間、平面線形は直線、縦断勾配は-3%、で土被りは約16mである。工事の特徴を表-1. シールド機概要を図-2、トンネル横断面を図-3に示す。

表-1 工事の特徴と検討方法

工事の特徴		検討方法	検討結果
①地質面	三連シールド工事として初めて掘削地盤が軟弱粘性土層	周辺地盤の変状を抑制するため、初期掘進区間で地盤変状計測を行い、適切な掘進管理値を検討	—
②シールド機	世界初の側部先行・中央揺動型三連シールド機	実機の 1/6 モデルによるチャンパー内の排泥実験を実施し、排泥方式を検討	・中央→系統排泥方式を採用 ・左右から排泥口のある中央へ土砂を集める噴射機構を設置
③覆工	三連シールドトンネルとして初めての鉄筋コンクリートセグメント	実物の異型(カモメ型)セグメントにより、中柱接続部の耐震検討を行い、載荷実験を実施	・せん断補強プレートの効果を確認

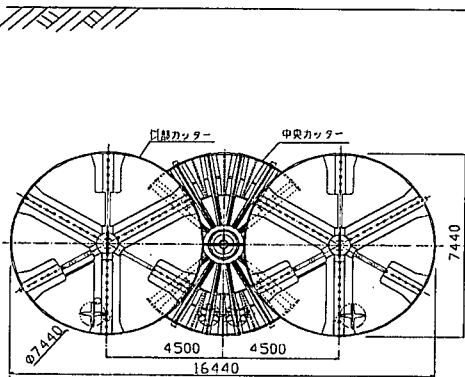


図-2 シールド概要

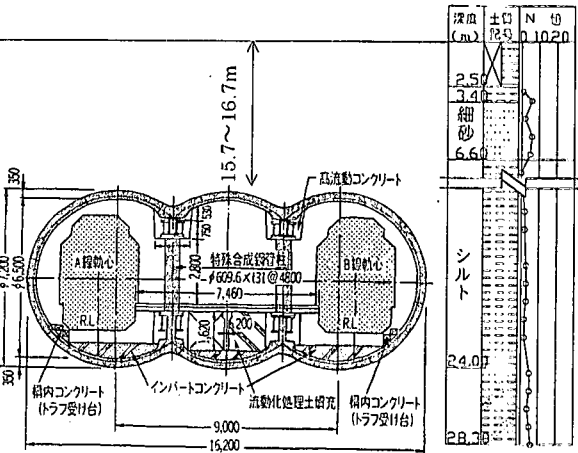


図-3 トンネル横断面図(停車場部)

3. 地質概要

シールド通過部は下部有楽町層粘性土(Ylc)で、N 値が 0~4 程度の軟弱粘性土地盤である。層相はシルト~粘土で部分的に細砂が混入しており、その粒土構成は粘性土 80%、砂質土 20%となっている。自然含水比が液性限界を超えているものが大半を占め、また、乱した後の試料の成形が不可能で鋭敏比を得ることができず、地盤を攪乱した場合に極めて強度劣化が大きいことが判明している。

4. シールド掘進管理

(1) 地盤変状計測概要

計測断面配置を図-4に示す。計測は発進立坑から 65mの区間に 3 断面実施した。いずれも沈下計によりシールド中央上を層別に計測を行った。また、中間地点の②断面ではこれに加えて側円上及び、シールド側部の 3 側線上で計測を実施した。

(2) 掘進管理

三連型シールドによる軟弱粘性土地盤の大断面掘削であることを考慮すると、シールド掘進に伴う周辺地盤の変状抑制が重要な課題である。変状抑制のためには、切羽泥水圧および裏込め注入圧を適切に管理し、シールド掘進に伴う地盤の乱れ及びテールボイドの沈下を最小限に抑える必要がある。

3 断面の計測のうち、①初期設定断面、②修正断面、③確認断面とし、本掘進における掘進管理値の検討を行った。図-5に全体の管理値、図-6に初期掘進における管理値を示す。なお、当初の設定管理値は切羽泥水圧を静止土圧相当の 250kN/m^2 、裏込め注入圧は注入圧上限値を切羽泥水圧 $+50\text{kN/m}^2$ 、裏込め注入率を140%とした。

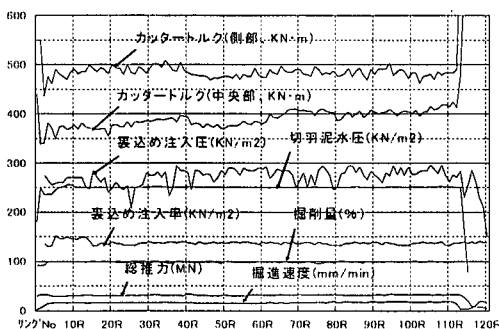


図-5 掘進管理値 (停車場部)

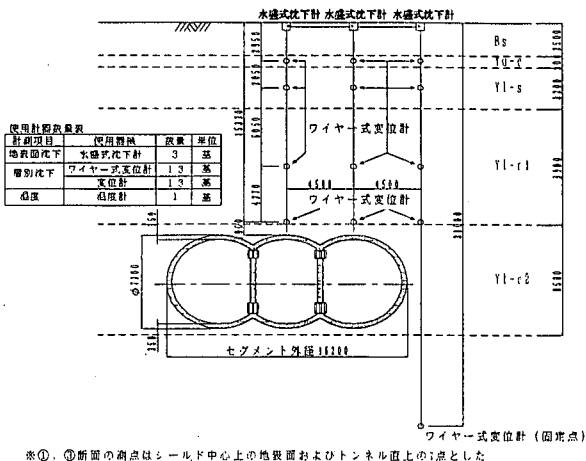


図-4 地盤変状計測器配置図および掘進管理目標値

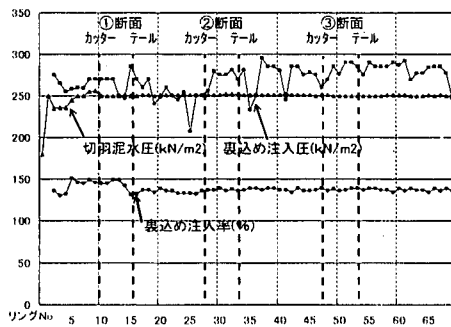


図-6 初期掘進における管理値

(3) 地盤変状計測結果

表-3に地盤変状計測結果を示す。また、図-7に各計測位置の地表面とシールド直上の鉛直変位の経時変化を示す。

単位 (mm)									
断面	計測位置	注入率	沈下計位置	先行変位	カッター変位	シールド通過変位	テール通過変位	テール通過変位	テール通過変位
①	250	140	地表面	3.0	2.2	-5.2	-8.3	-16.7	-16.3
			シールド直上	3.1	1.3	6.3	4.6	-5.5	-9.4
②	250	133	中央	4.2	1.5	-2.2	-0.7	-6.9	-11.5
				1.5	5.9	3.4	6.6	-3.0	-9.4
				0.9	1.5	-2.1	-2.0	-6.0	-10.6
			右側	1.2	9.2	4.1	3.1	-0.9	-6.9
				0.5	2.2	-2.2	-2.6	-7.9	-9.2
				-0.3	0	-0.9	-1.3	-1.4	-2.1
③	250	139	地表面	1.0	3.2	2.6	2.6	-7.0	-12.6
			シールド直上	-0.7	1.2	0.6	0.2	-12.4	-20.3

表-3 地盤変状計測結果

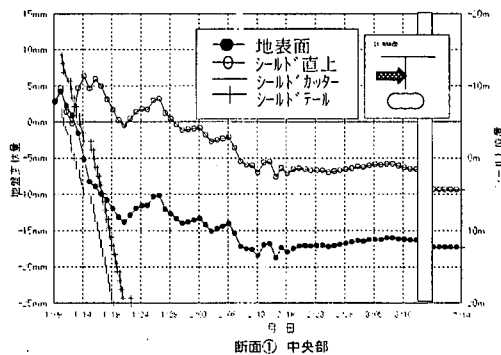


図-7 (1) 計測結果の経時変化図

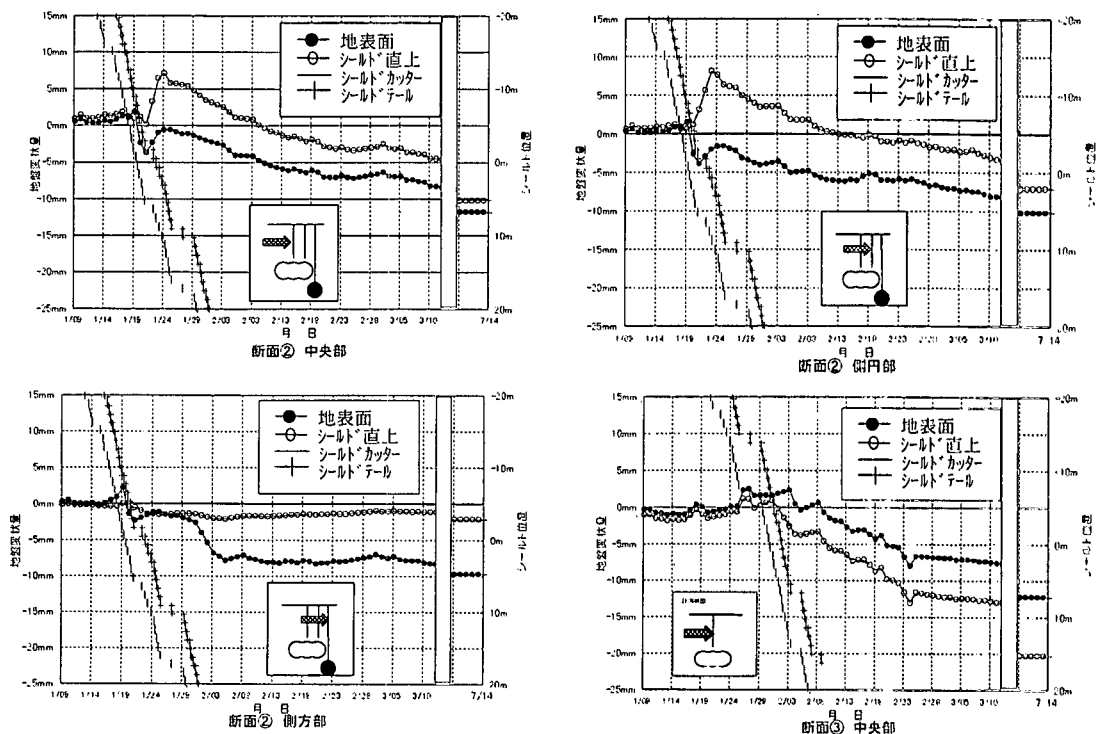


図-7(2) 計測結果の経時変化図

今回の計測結果をまとめると以下の通りである。

【シールド通過前変位】

各計測位置で観測された隆起は、最大でも 3.1 mm と小さな値となっている。このことから、切羽での管理泥水圧(250kN/m²)は妥当であるとして、その後の管理泥水圧も同値での管理を行った。なお、各隆起量は地表面に比べシールド直上の方が小さい値となっている。

【シールド通過変位】

シールド通過中の変位は、計測断面①、②では地表面で沈下、シールド直上で隆起の傾向を示しており、その値は地表面で-7.4mm~-0.0mm、シールド直上で+0.9~+5.0mm となっている。

地表面とシールド直上で変位の傾向が異なるが、シールド直上では、掘進に伴う切羽圧力、泥水圧、シールド掘進に伴うスキンプレートとの摩擦により地盤は著しく乱されており、そのためこれらの施工時荷重に対し敏感に反応したことによると判断されるが、隆起の明確な理由については判断が難しい。一方、地表面での沈下傾向については、切羽通過前ならびに切羽通過中の地盤の乱れにより、圧密沈下がすでに進行していると想定される。

【テール通過変位】

テール通過変位は、地表面で-3.1mm~+1.5mm の変位となっており、軟弱地盤における三連シールドの掘進であることを勘案すると、地盤変位量は小さく、特にテール通過変位に大きな影響を与える裏込め注入圧の管理値が妥当であったことが伺える。ここで、計測位置での管理裏込め注入圧は、断面①：約 250 kN/m²、断面②：約 280kN/m²、断面③：約 280 kN/m² である。また、断面②における土圧計計測値の結果から、実際に作用している裏込め注入圧はトンネル天端で 250kN/m²、トンネル下端で 280kN/m² であった。

【テール通過後変位】

テール通過後の変位は、各計測位置で一様に沈下している。その値は、地表面で-7.7mm~-14.2mm、シールド直上で-0.8mm~-17mm となっており、軟弱地盤における掘進であることを勘案すると、圧密沈下量は比較的小さく、現場における掘進管理が妥当であったことがうかがえる。また、圧密沈下は、テール通過から約 6 ヶ月で概ね収束している。

5. 地盤変状解析

営団では、これまで軟弱地盤掘削時の地盤変状解析として2次元FEM解析による手法を用いており、本手法の有用性を確認している¹⁾。ここでは、この提案手法に裏込め注入圧を考慮したときのテールボイドの即時沈下とその後の圧密沈下量を求め、実測値との比較を行い、この計算方法の適用性を確認する。

(1) 解析方法

解析ステップを図-8に示す。まず、STEP-1で初期応力解析を行い、STEP-2でテールボイド部の応力を解放させるとともに、裏込め注入圧をトンネル中心から外側へ作用させる。ここで、応力解放率 $\alpha=0.16$ 、裏込め注入圧はセグメントに設置した土圧計の計測結果を基に設定した。STEP-3は、STEP-2の解析結果のうち、せん断ひずみ領域に着目し、せん断ひずみが0.1%以上の領域で圧密沈下が生じるとして、せん断ひずみの大きさに応じて圧密沈下量を求める。以下に圧密沈下解析方法について説明する。

(2) 圧密沈下解析方法

正規圧密粘土では、せん断変形を受けて地盤が乱れると、垂直応力 σ_v が変化しなくても圧密が進むことが分かっている(図-9)。

地盤の乱れに起因する体積圧密率(α')は、森・赤木²⁾³⁾の研究を参照して次のように求める。

$$\alpha' = Cc' / (1 + e_0) \cdot \log(k \cdot \gamma + 1)$$

$$Cc' = 0.3Cc$$

$$k = 0.33Ip^{0.97} \cdot \log St$$

ここに、

α' : 乱れに起因する圧縮収縮率

k : 乱れを表すパラメータ

e_0 : 乱れを受ける前の粘性土の初期間隙比

Cc' : 乱れを受けた粘性土の再圧密領域での圧縮指数

なお、地盤のせん断ひずみ(γ)は、テールボイド部のFEM解析より得られるせん断ひずみの増加分を考え、 $\gamma \geq 0.1\%$ の範囲で圧密沈下が生じるものとする。

(3) 解析条件

検討モデルを図-10に示す。検討断面の土かぶりは16.7m、解析領域はトンネルの下方を1D、側方をトンネル中心までのかぶりの3倍とした。

表-4に、地質調査結果を基に設定した土質定数を示す。

ここで、地山の変形係数は下式により設定した。

〔砂質土〕: $E=2500N(kN/m^2)$

〔粘性土〕: $E=210C(kN/m^2)$

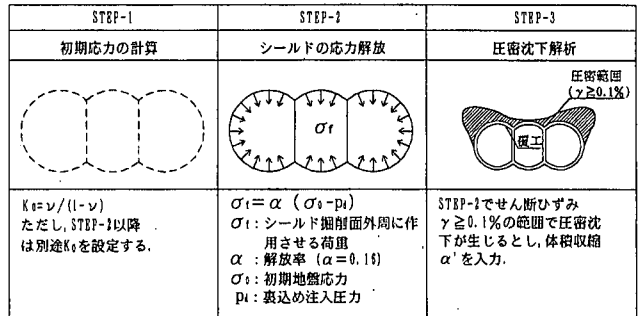


図-8 解析ステップ

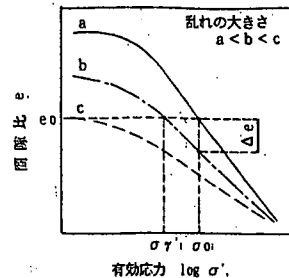


図-9 乱れに起因する圧密曲線の変化

St : 鋭敏比

γ : 地盤のせん断ひずみ

Cc : 乱れを受ける前の粘性土の圧密指数

Ip : 塑性指数

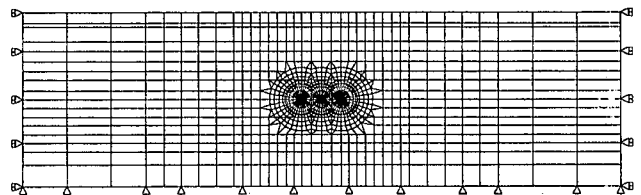


図-10 解析モデル

表-4 設計定数

地質名	埋め戻し土	上部荷重層 (粘り土)	上部荷重層 (砂質土)	下部荷重層 (粘り土)	下部荷重層 (砂質土)	掘削間隙 10mm層	掘削間隙 25mm層
砂質土	5a	Yurc	Yurc	Yurc1	Yurc2	10	50
粘性土	5b	Yurc	Yurc	Yurc1	Yurc2	10	50
掘削間隙比	0.40	0.45	0.40	0.45	0.45	0.45	0.30
粘着力 (kN/m ²)	0	10	0	40	60	80	0
内部摩擦角 (度)	20	0	20	0	0	0	40
単位体積重量 (kN/m ³)	14	17	17	17	17	17	16
静止土圧係数	0.50	0.80	0.50	0.80	0.80	0.80	0.35

(4) 解析結果

以上の解析手法から求めた解析結果を図-11に示す。

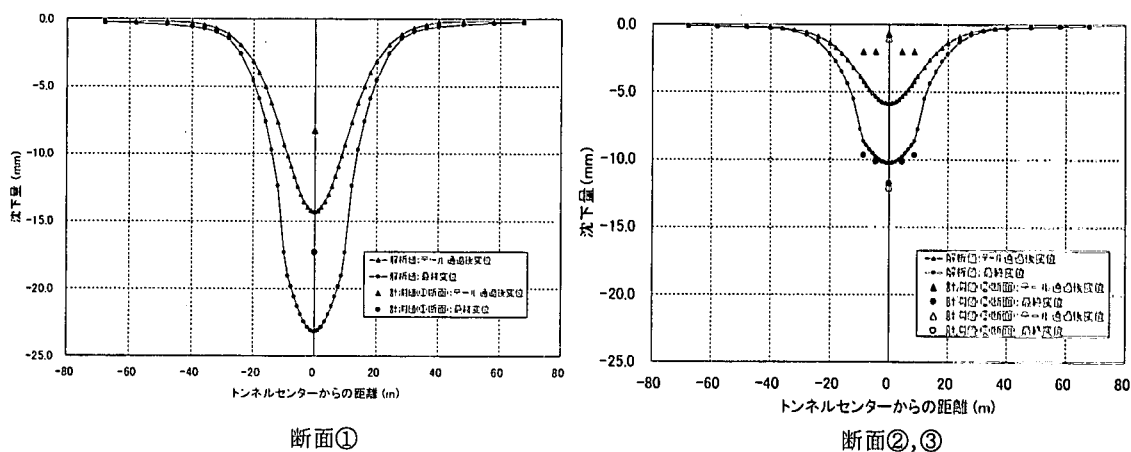


図-11 実測値と解析値の比較

断面②, 断面③では, テール通過時の計測変位は, 約 1mm~2mm の沈下となっており, 解析結果では, 約 6mm の沈下を示している。一方, 最終計測結果は, 断面②で約 12mm, 断面③で約 12mm となっており, これは解析結果の約 10mm とよく一致している。ここで, テール通過時の沈下量が解析値と計測値で相違しているにもかかわらず, 最終沈下量が良く一致している。テール通過前においても, 切羽圧力, 泥水圧, シールド通過時の地盤との摩擦等により地盤は乱されており, これらの影響も含めて圧密沈下が発生したと考えられる。また, テール通過時の解析結果には, テール通過までの様々な施工時荷重の影響を含んだものであることから, 本手法は現場における圧密沈下量を評価していると考えらる。なお, 地表面沈下の横断方向の広がり, は, 側円部から $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ の範囲であった。

断面①では, テール通過時の計測変位は約 8mm の沈下, 最終沈下量は約 17mm の沈下となっているが, 解析結果では, テール通過時に約 14mm, 最終沈下量は約 23mm となっている。沈下量が断面②, ③と比べて大きな値となっているが, 断面①では, 裏込め注入圧が断面①, ②と比べて 30kN/m^2 小さな値となっており, 大きな解放応力が発生したことが理由と考えられる。

6. おわりに

本報告では, 三連円形シールド工法を採用した場合の軟弱地盤の挙動について述べるとともに, 施工時荷重として裏込め注入圧を考慮したテールボイドの即時沈下と圧密沈下を FEM 解析より求めた。以下に検討結果をまとめる。

- ① トンネル直上の地表面の鉛直変位は, テール通過までで最大約 8mm, 最終沈下量が最大約 17mm の沈下となっており, 三連円形シールド工法は掘進管理を適切に行えば, 軟弱地盤中においても十分適用可能であると判断できる。
- ② 裏込め注入圧を考慮した FEM 解析を行った結果, 解析結果は実測値と良い一致を得た。このことから, 営団の提案式は, 施工時荷重を適切に評価することによって十分適用できることが分かった。

参考文献

- 1) 藤木育雄・横田三則・米島賢二・村田基代彦: 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. トンネル工学研究発表会論文報告集, 第 1 巻, pp. 83~88. 1991 年 12 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