

土被りの浅い大断面シールド工事における地盤変状防止対策

The Counterplan of Ground Deformation for the Large Diameter Shield Tunneling Method under Conditions of Thin Overburden

倉岡 豊*
Yutaka Kuraoka

要 約

本報文は、福岡市高速鉄道1号線延伸工事榎田東工区における泥水式シールド（ $\phi 10.2$ m, 延長958.9m）の施工報告である。工区延長のうち、終端側350mは、空港エプロン部直下（土被り $0.7D \sim 1.0D$ ）であり、地表面沈下量は10mm以下が要求された。そこで、地盤変状を計測しながら、切羽の泥水管理を含めて慎重な施工管理を実施した。その結果、目標の地表面沈下量10mm以内を満足することができ、地上構造物への影響を避けることができた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 泥水配合検討および泥水管理
- § 4. 計測施工による掘進管理
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

福岡市高速鉄道1号線博多～空港間延伸工事は、九州の陸の玄関口 JR 博多駅と空の玄関口福岡国際空港とを結ぶ、延長約3.1kmの地下鉄工事である。当該工事は、このうち博多区榎田に構築する榎田中間換気所を発進立坑とし、空港内到達部までを泥水式シールド（複線断面）で施工したものである。特に、シールド延長958.9mのうち約800mが福岡空港内のエプロン下であり、土被り10～15mの深度を直径10.2mの泥水式シールドにより掘進するため、施工時の沈下抑制が極めて重要な課題となった。

そのため、先ず立坑施工時に採取した土をもとに泥水に関する特性試験並びに浸透実験を実施し、泥水特性の管理目標値を満足するような配合を選定するとともに、実地盤への適応性も確認した。次に、シールド通過に伴う地盤変状の管理のために、事前に有限要素法（以下、FEM）により、切羽部およびテールボイド部における応力解放率と地盤沈下の関係を解析した。さらに、それらの結果並びにトライアル区間における沈下計測結果をシールド掘進操作にフィードバックする管理施工を実施した。その結果、地表面沈下量を10mm以内に管理することが可能となり、当初懸念されていた地上構造物への影響もなかったため、その詳細を報告する。

§ 2. 工事概要

2-1 工事概要

工事概要を Table 1 に、路線および地質縦断図を Fig. 1 に示す。シールド発進直後に民地である福山通運倉庫直下を通過した後、空港内を斜めに横断し、空港エプロン部、給油管、駐機場下部を通過する路線である。また、シールドの構造を Fig. 2 に示す。

*九州(支)福岡薬院(出)所長

Table 1 工事概要

発注者	福岡市交通局
工事名	福岡市高速鉄道1号線 複田中間換気所および地下一般部工事(複田東工区)
工事場所	福岡県福岡市博多区複田1丁目~大字下白井
工期	昭和62年9月13日~平成3年10月1日
工事内容	立坑工：連続地中壁一式 泥水加圧シールド工（一次覆工） (1)シールド延長 958.9m (2)シールド機外径 $\phi 10,200\text{mm}$ (3)セグメント（ダクタイル，RC中子形）952リング 二次覆工：インバートコンクリート延長 959.9m 防護工：(1)凍結工（発進部）一式 (2)薬液注入工（発進部，到達部）一式 線形：直線部 411.576m，曲線部（ $R=600\text{m}$ ） 547.324m

2-2 地質概要

地質は、上部より沖積シルト層、沖積砂層および風化花崗岩、さらに中世白亜紀の花崗岩の基盤から成っている。シールドは大部分が N 値50以上の風化花崗岩（マサ土）を通過する。土被りの浅い到達部付近では、下半に圧縮強度 $10\sim 150\text{kgf/cm}^2$ ($0.981\sim 14.7\text{MPa}$)の未風化花崗岩が、クラウン部には沖積砂層が出現する。各土層の物性値については、Table 2 に示すとおりである。なお、主要計測断面 (B_E , C_E , E_E 断面) および給油管横断面 (G_E 断面)の土質構成とシールドの位置関係を、Fig. 3 に示す。

§ 3 . 泥水配合検討および泥水管理

3-1 地盤変状の発生要因

シールド工法における地盤変状の発生要因としては、次のものが考えられる。

- ①シールド掘進に伴う周辺地山の攪乱
- ②切羽における地山崩壊
- ③テールボイドの応力解放に基づく弾塑性的沈下
- ④裏込め注入の不良および時間的遅れ
- ⑤蛇行修正，曲線施工時の余掘り
- ⑥地下水の流入による圧密沈下
- ⑦セグメントリングの変形

①，③および⑦については、トンネル径、土被り、地盤の土質特性等に起因するものであり、シールド工法の特長上避けられないものである。一方、これら以外の要因は施工に起因するものであり、当該工事では次に示すような施工法を採用することにより防ぐこととした。

- ・良好な泥水の使用と厳密な泥水管理 (②, ⑥)。
- ・即時裏込め注入工 (④)。
- ・自動測量によるリアルタイムの線形管理とファジィ制御による自動運転 (⑤)。
- ・地盤変状計測による計測管理施工。

この章では、泥水式シールド工法において特に重要な「泥水管理」について報告する。

3-2 全体フロー

泥水配合検討の全体フローを Fig. 4 に示す。作泥水の配合を決定するために、まず選定した泥水材料で試験練り並びに泥水特性試験を行い、管理基準値を満足するよ

Table 2 物性値一覧表

	沖積粘性土層 a_c	沖積砂質土層 a_s	洪積粘性土層 d_c	洪積砂質土層 d_s	風化花崗岩層 G_r				
					D_{s2} 岩盤	D_{s1} 岩盤	C_2 岩盤	C_1 岩盤	B岩盤
深度 GL-m	1.5~2.5	1.5~8	7~15						
N 値 (平均 N 値)	0~5	1~33 (5~10)	5	5~50 (15~30)	25~50	50以上	—	—	—
細粒分含有量： F_c (%)	50	5~22	78~93	5~22	25	5~28	6	5	—
均等係数： U_c	6	3~62 (5~20が主)	—	8~167 (5~20が主)	73~100	10~192 (主として100前後)	15	10	—
透水係数： K (cm/s)	—	$5 \times 10^{-3} \sim$ 1×10^{-3}	—	$1 \times 10^{-2} \sim$ 1×10^{-3}	1×10^{-5}	$(4.69 \times 10^{-5} \sim$ $1.43 \times 10^{-3})$ 主として 1×10^{-4}	1×10^{-5}	1×10^{-5}	—
水頭位置： h ; T.P. ± m	—	T.P.+3.0m (GL-1.2)	—	T.P.+1.0~ 4.0m	T.P.+2.0~ 3.0m	T.P.+2.0~ 3.0m	T.P.+2.9 GL-1.0m	T.P.+2.8 GL-1.1m	—
軸圧縮強度 q_v	—	—	0.6kgf/cm ²	—	—	—	20~48 kgf/cm ²	56~90 kgf/cm ²	100~209 kgf/cm ²
粘着力 C_v (kgf/cm ²)	—	—	0.4kgf/cm ²	—	—	0.2kgf/cm ²	—	—	—
内部摩擦角 ϕ	—	—	0°	—	—	30°	—	—	—

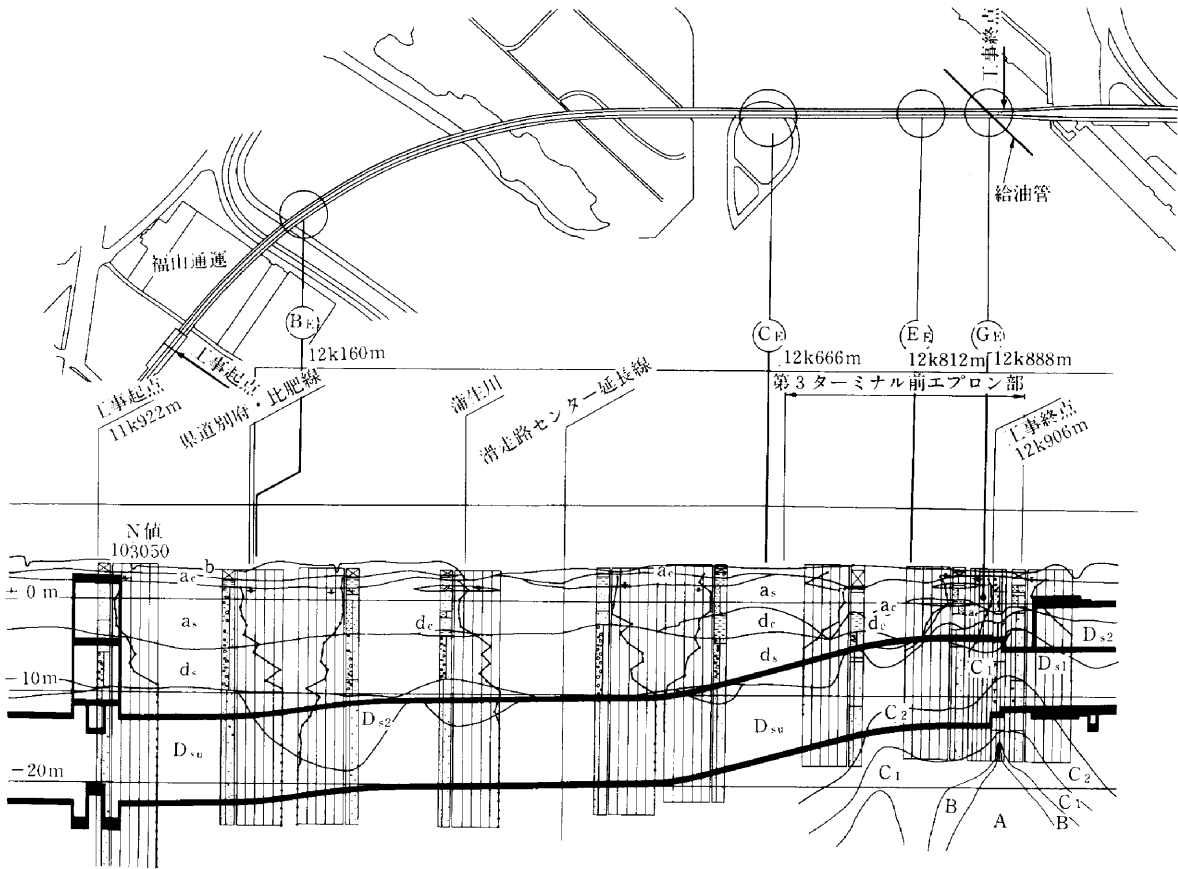


Fig.1 路線および地質縦断面図

うな配合を選定する。次に、泥水の実地盤に対する泥膜形成の優劣を判断するために、実地盤を用いた浸透実験を行う。さらに、実施工中は特性試験を定期的に行い泥水特性の管理に努める。

シールド機本体要目	
外径	φ10,200mm
機長	9,090mm
総推力	9,900tf
切羽面積当り推力	121tf/m ²
シールドジャッキ	300tf×1200st×33本

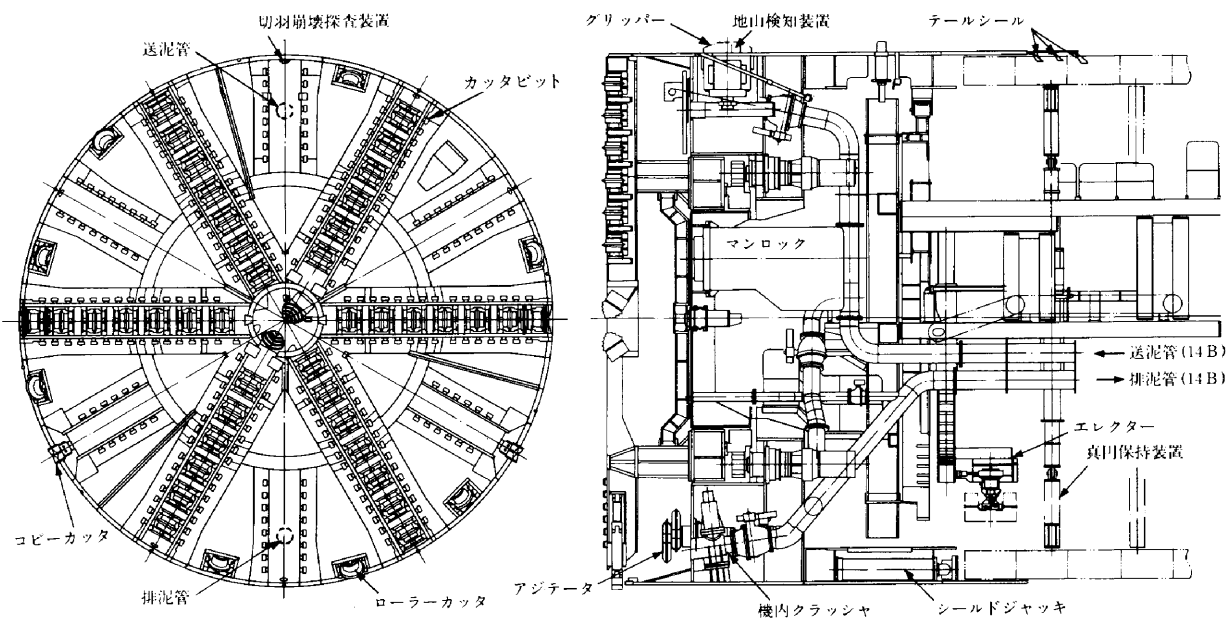


Fig.2 シールド機械構造図

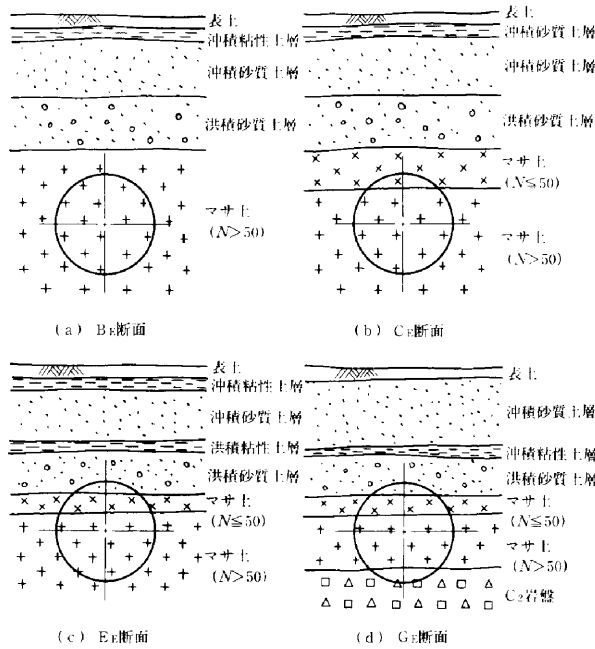


Fig.3 土質構成とシールド掘進位置の関係

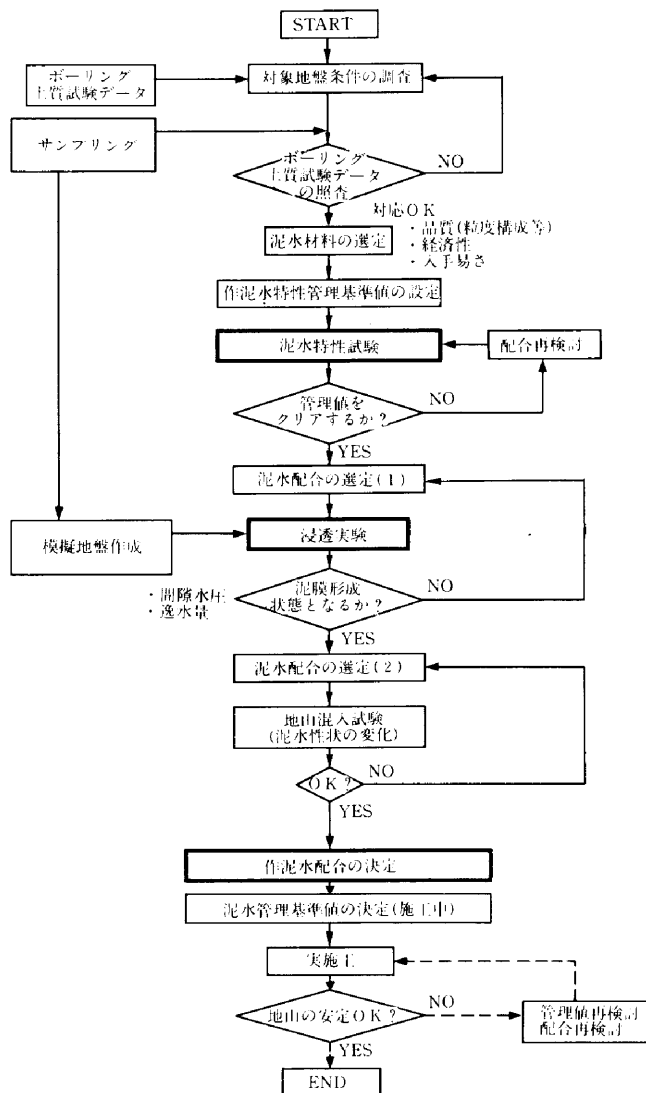


Fig.4 全体フロー

3-3 泥水特性試験および浸透実験

泥水特性試験項目と管理基準値を Table 3 に、浸透実験装置を Fig. 5 に、浸透実験フローを Fig. 6 にそれぞれ示す。模擬地盤としては立坑掘削時にサンプリングした試料を用いるが、完全に実地盤を再現することは不可能である。本実験では、透水係数を実地盤と一致させることを目標に模擬地盤を作成した。地盤作成後は直ちに泥水を注入し、0.2kgf/cm² (0.02MPa) で加圧し、地盤中の間隙水圧および逸水量の経時変化を記録した。

Table 3 試験項目および管理基準値

試験項目	測定器具	管理基準値	
比重試験	マッドバランス	1.1~1.2	
レオロジー特性	ファンネル粘性 (FV)	ファンネルロート	25~35s
	見かけ粘性 (AV)	ファンVGメータ (MODEL 135)	12~20cp
	プラスチック粘性 (PV)		
	イールドバリュウ (YV)		
ゲルストレングス (GS)		-	
透過特性試験 (API規格)	透過試験器 (P=3kgf/cm ²)	20cc以下	
安定性試験 (沈降分離)	メスシリンダ (1000cc)	90%以上	

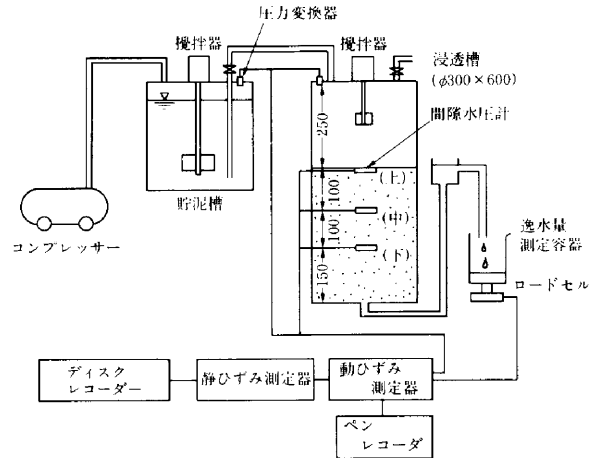


Fig.5 浸透実験装置

3-4 結果の考察

泥水特性試験結果より基準値を満足する配合の範囲が見いだされた。この中から経済性等を勘案して数種の配合を選定し、それらに対して浸透実験を行った。浸透実験結果の一例は、Fig. 7 に示すとおりである。さらに、泥水の泥膜形成の優劣については、間隙水圧計と逸水量の挙動から判断することにした。すなわち、Fig. 7 に示すとおり地盤からの逸水量は少なく、その増加量は1分後にはほとんどゼロとなり、地盤中の間隙水圧はあるピーク値をとり時間とともに消散していることが推測できる。このことから、良好な泥膜が形成されているものと判断し、実地盤への適用性が確認された。

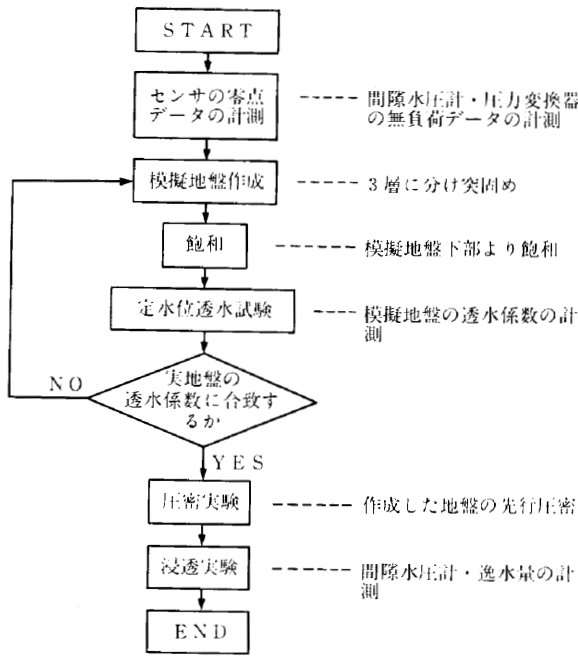


Fig.6 浸透実験フロー

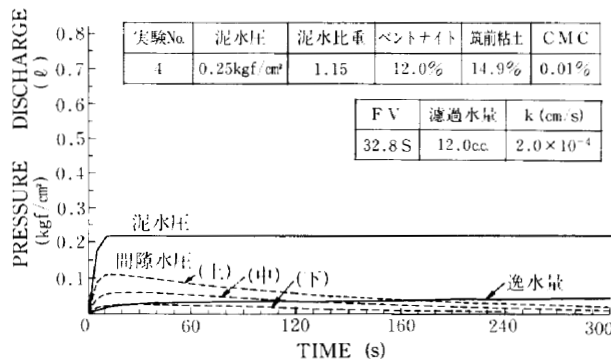


Fig.7 浸透実験結果(一例)

3-5 施工中の泥水管理

施工中の泥水管理では、泥水特性試験項目のうち比重、ファンネル粘性および濾過水量について実施した。試験は掘削開始前と掘削終了時の1リングにつき2回行い、その結果を記録するとともに、基準値を逸脱しないように泥水特性の管理がなされた。なお、1リング掘削後は地山の細粒分の混入や比重の増加によりベントナイト濃度が下がり、濾過水量が増大する傾向が常にみられたが、ベントナイトやCMCの添加により改善を行い次リングの掘削に備えた。しかし、希釈水や作泥水にフィルタープレスからの二次処理水も使用していたために、凝集剤(PAC)中の陽イオン(Al³⁺)が残留して、泥水中のベントナイト粒子が凝集し濾過水量が増大することがあった。これについては、凝集剤添加量を再検討するなどの対処も試みたが、今後の課題として残された。

§4. 計測施工による掘進管理

シールド終端部の土被りの浅い箇所が存在する空港構造物への影響を最小限に抑える目的で、計測施工管理を実施した。すなわち、管理基準(地表面沈下で10mm以下)内に地盤変状を抑制するため、各計測点毎に計測結果の分析およびトライアル掘削を行った。

4-1 計測施工管理の手順

(1) 事前検討

FEMを用いて地盤の変状解析および近接構造物の安定解析を実施した。

(2) 事前計測

B_E、C_EおよびE_E地点でのトライアル計測、並びにA_E、D_EおよびF_E地点での確認のための計測を行った。

(3) シールド掘進方法の検討

計測結果を用いたフィードバック解析よりシールド掘進方法の検討を実施した。

(4) 近接計測

最も注意を必要とする給油管横断部G_E地点での沈下量を計測した。

(5) 事後計測

後続の沈下等に関する長期安定性の検討を行った。

4-2 事前検討

本施工地盤でのシールド掘進に伴う沈下原因は、次の2つの要素の影響が大きい。すなわち、

- ①切羽部での応力解放、
- ②テールボイド部での応力解放、

これらの解析をより厳密に行おうすれば、3次元変形解析が必要であるが、実務上問題のない範囲でFig.8のフローチャートに示すような簡易な予測手法を用いて解析を実施した¹⁾。この方法では、まず切羽部およびテールボイド部における応力解放率 α をFEMの軸対称モデルを用いた逐次掘削解析によって求める。次に、応力解放率 α を用いて、実地盤モデルを対象としたFEM平面2次元解析を行い、地盤変形の子測を行う。ここで、応力解放率 α は次式で定義されている (Fig.9参照)。

$$\alpha = (\sigma_1 - \sigma) / \sigma_1$$

なお、 σ_1 は掘進前の初期応力である。

解析では、切羽土圧とテールボイド長をパラメーターとして解放率を算出した。その結果について、テールボイド長(L)をシールド掘削径(D)によって無次元化した(L/D)と応力解放率 α で整理したものがFig.10である。主計測断面での予測沈下量については、Table4に示すとおりである。この解析結果を、切羽土圧の管理と裏込め注入施工方法の検討に反映させた。

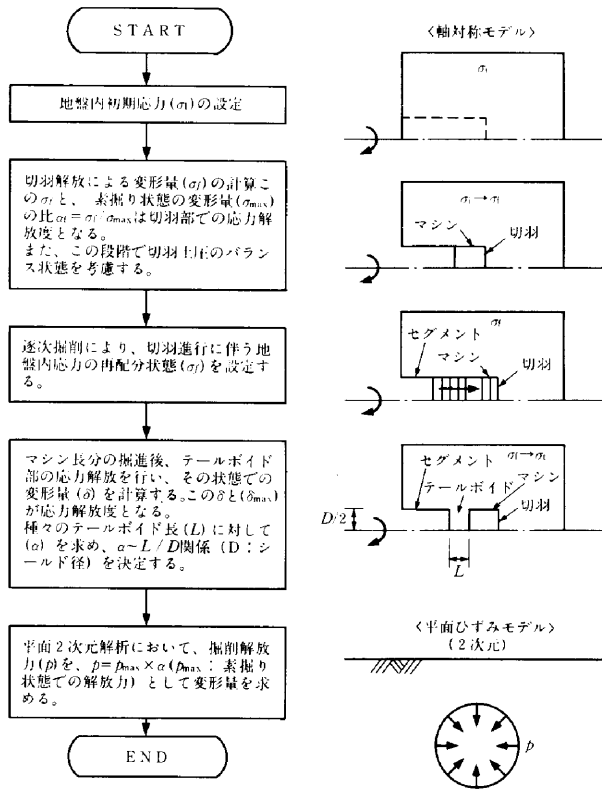


Fig.8 変形解析のフローチャート

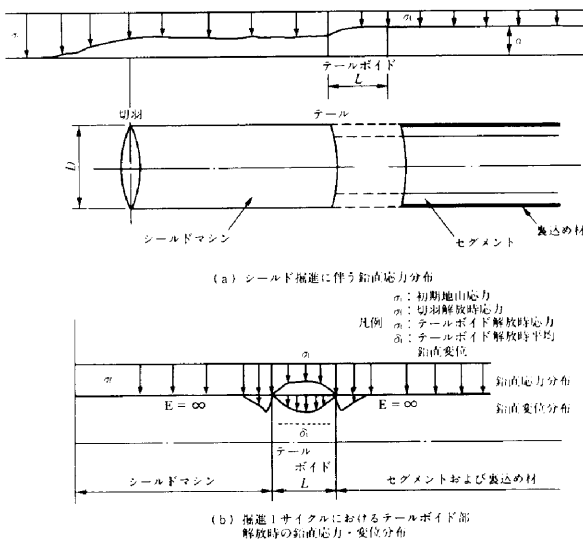


Fig.9 シールド掘進過程を考慮した鉛直応力分布推定図

4-3 計測結果および考察

(1) 泥水圧の影響

地盤沈下の誘因としては、設定泥水圧の大きさと泥水圧の変動が考えられた。Fig. 11 はトリアル区間での設定泥水圧と先行沈下量の関係を示したもので、設定泥水圧が高いほど先行沈下量は小さくなっている。

また、Fig. 12 は泥水圧の変動と沈下量の関係を示し

ている。この時の設定泥水圧は、 2.2 kgf/cm^2 (0.216 MPa) であり、静水圧 2.0 kgf/cm^2 (0.196 MPa) より 0.2 kgf/cm^2 (0.02 MPa) 高くした。図より、設定値を中心に

Table 4 予測沈下量一覧(cm)

断面	位置	$\alpha = 1$ 素掘り	$\alpha = 0.24$ テールボイド 切羽100%	$\alpha = 0.14$ テールボイド 切羽50%	$\alpha = 0.04$ テールボイド のみ
BE	地表面	8.37	2.01	1.17	2.01
	直上1m	17.18	4.12	2.41	0.69
CE	地表面	11.02	2.64	1.54	0.44
	直上1m	19.52	4.68	2.73	0.78
EE	地表面	11.29	2.71	1.59	0.45
	直上1m	19.15	4.6	2.68	0.77
GE	地表面	7.79	1.87	1.09	0.31
	直上1m	11.68	2.8	1.64	0.47

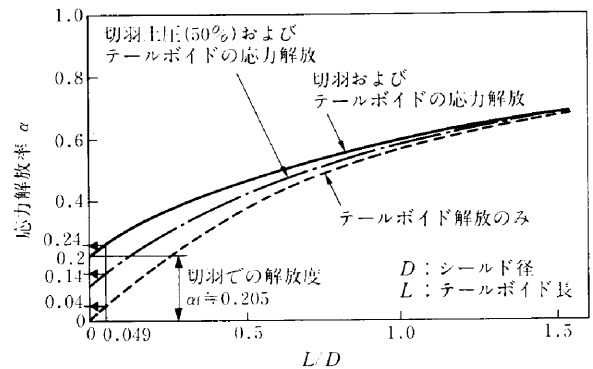


Fig.10 テールボイド長と応力解放率の関係図

* $D = 10.2 \text{ m}$, $L = 0.5 \text{ m}$ とすると $L/D = 0.049$

上図より応力解放率 α は

- テールボイドのみ解放の場合 $\alpha = 0.04$
- テールボイド+切羽50%解放の場合 $\alpha = 0.14$
- テールボイド+切羽100%解放の場合 $\alpha = 0.24$

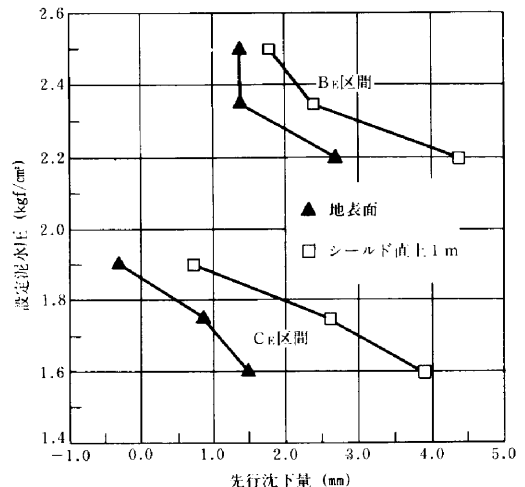


Fig.11 設定泥水圧と先行沈下の関係

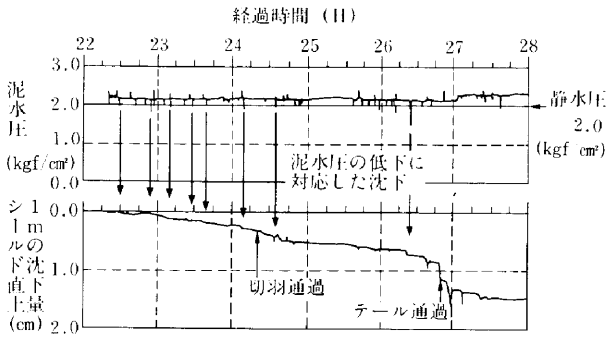


Fig.12 泥水圧の変動と沈下の関係(BE-2)

泥水圧が変動しており、その幅は $\pm 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ ($\pm 0.02 \text{ MPa}$)程度である。さらに、矢印で示している部分においては、泥水圧の変動が大きく静水圧以下になっており、沈下はこの時点で進行することが確認される。したがって、泥水圧の変動幅を極力小さくするように注意する必要がある。なお、泥水圧の変動幅はシールドの構造、地盤条件等により変化するものであるから、泥水圧が変動しても静水圧を下まわらないように設定泥水圧を定めることが極めて重要である。

(2) シールド通過中のピッチングの影響

シールド通過中の地盤変状の主な要因は、ピッチングである。地盤変状については、計画縦断勾配に対してシールド機自体が常に傾斜しているために生じる変状並びに掘進時のジャッキアップによりマシンテール部が一時的に持ち上げられて生じる変状の2種類が考えられる。

Fig. 13 は、登り勾配の施工時に生じたピッチングの経時変化と、シールド直上1m地点および地表面での沈下量を併せて示したものである。全区間において、常にシールドの勾配がトンネル勾配より小さい状態で掘削しているため(Fig. 14 参照)、シールド直上1m地点では掘進とともにシールドテール部直上の地盤が押し上げら

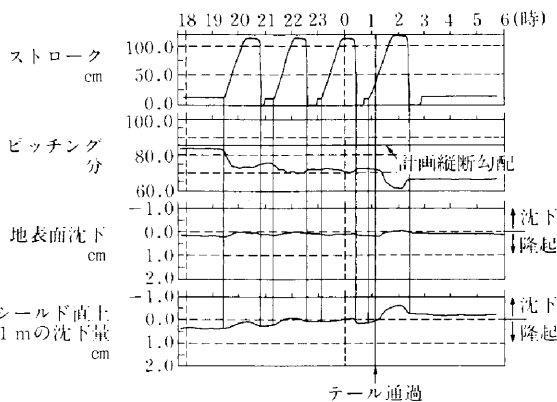


Fig.13 ピッチング量と地盤変位の経時変化(CE-2)

れ隆起傾向にあることが認められる。一方、テール部通過後は沈下が発生している。

(3) テール通過時の裏込注入圧と沈下

Fig. 15 は、裏込注入圧と沈下との関係を示したものである。本シールド工法では、即時裏込注入工が採用さ

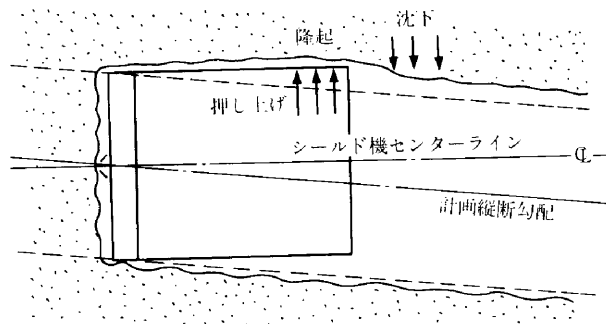


Fig.14 ピッチングと地盤変位の関係

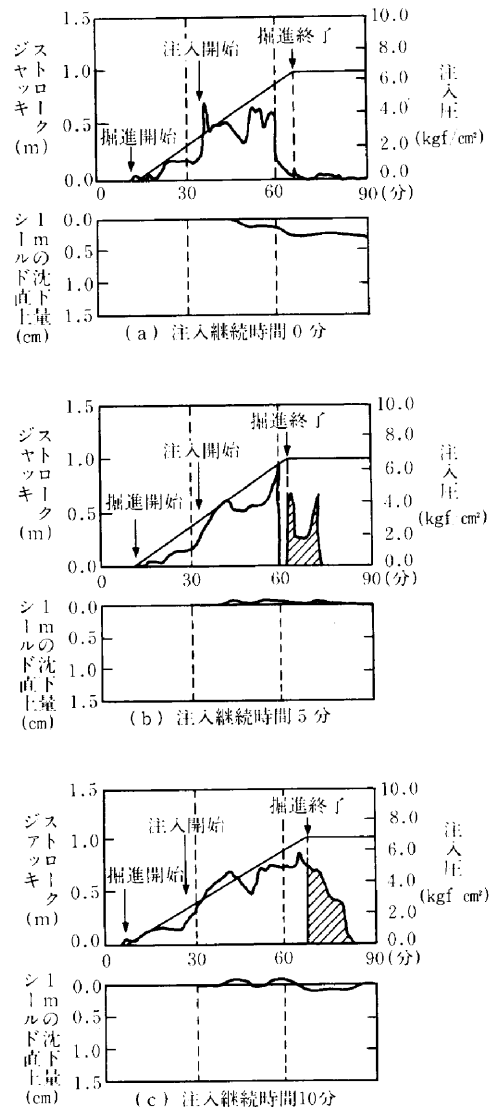


Fig.15 裏込注入継続時間と沈下の関係(BE区間)

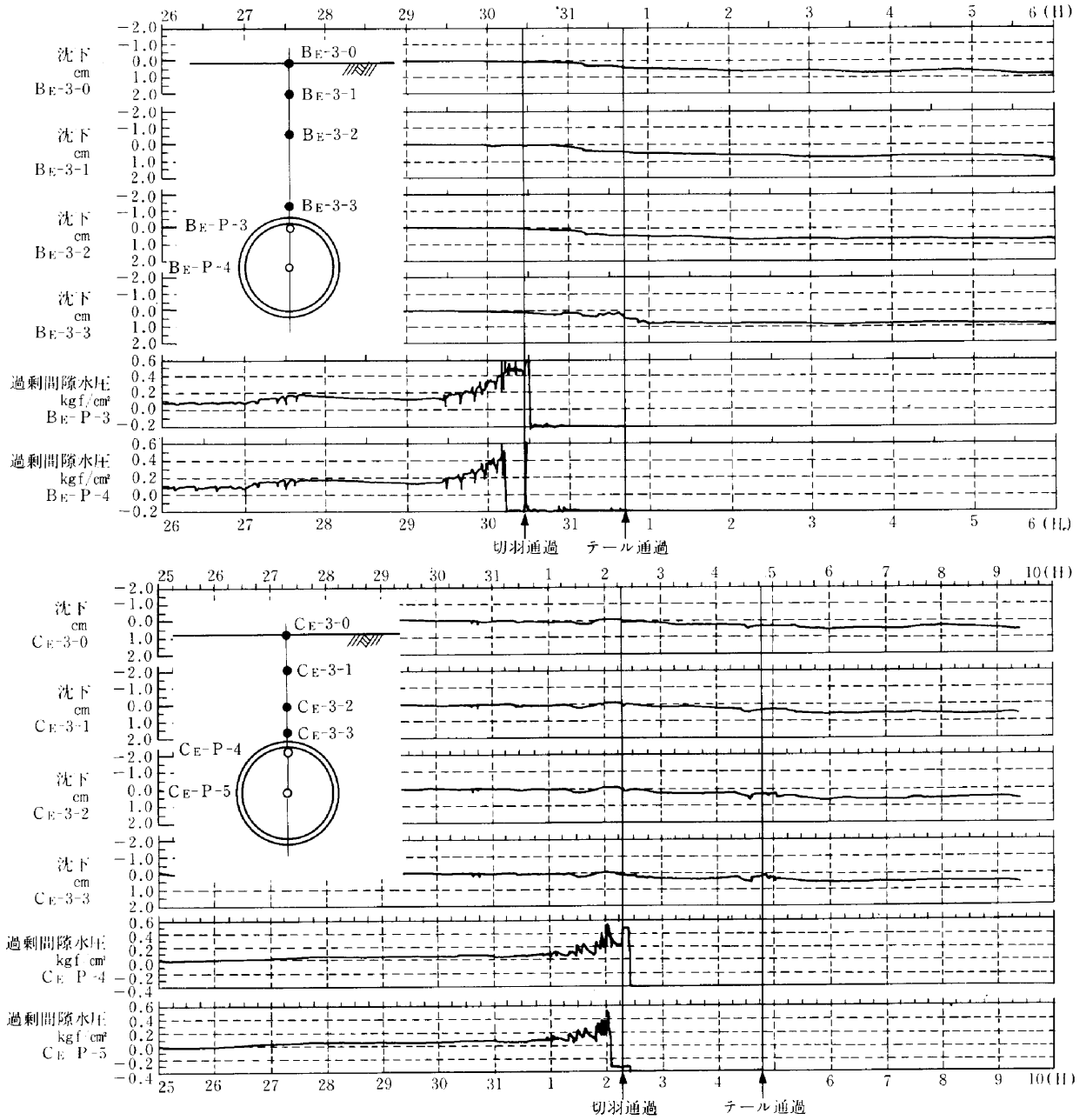


Fig.16 BE, CE測点での過剰間隙水圧と沈下の経時変化

Table 5 事前FEM解析と実測値との比較

	事前FEM解析値 (cm)				実測値 (cm)		逆算 α 値	
	$\alpha = 1$	$\alpha = 0.24$	$\alpha = 0.14$	$\alpha = 0.04$	全体	初期沈下	全体	初期沈下
BE 地表面	8.37	2.01	1.17	0.33	0.74	0.3	0.09	0.04
BE クラウン直上1m	17.18	4.12	2.41	0.69	0.90	0.4	0.05	0.02
CE 地表面	11.02	2.64	1.54	0.44	0.51	0.2	0.05	0.02
CE クラウン直上1m	19.52	4.68	2.73	0.78	0.57	0.3	0.03	0.02
EE 地表面	11.29	2.71	1.59	0.45	0.02	0	0	0
EE クラウン直上1m	19.15	4.60	2.68	0.77	-0.43	0	-0.02	0
GE 地表面	7.79	1.87	1.09	0.31	0.10	0.1	0.01	0.01
GE クラウン直上1m	11.68	2.80	1.64	0.47	0.30	0.1	0.03	0.01

れたため、セグメントのグラウト注入口がシールドテールパッキンを通過するストローク50cmの所で注入圧が上昇し、注入が開始されている。また、トライアル区間において、掘進終了後の継続注入時間を0、5、10分と3通り変化させた。その結果、5分以上の継続注入で沈下量がほぼゼロになることがわかった。

(4) 泥水圧と過剰間隙水圧

泥水シールドにおいて、掘削地盤の透水係数が小さい場合、泥水の浸透により切羽地盤の間隙水圧は地下水圧より上昇（過剰間隙水圧が発生）し、有効泥水圧（差圧－過剰間隙水圧）が小さくなり、切羽安定上問題になると報告されている²⁾。

現場地盤の透水係数は 10^{-4} オーダーと小さく、過剰間隙水圧の発生が予想された。Fig. 16に B_E および C_E 断面において発生した過剰間隙水圧と沈下との経時変化を示している。これらの断面においては、過剰間隙水圧の発生と沈下発生時期には相関があることが確認される。すなわち、有効泥水圧が小さくなったために、地盤変状を誘発したものと考えられる。

(5) FEM 解析と実測値の比較

Table 5 に事前 FEM 解析と実測値の比較を示している。この表から、本施工では慎重な施工管理により応力解放率を0.01～0.05とすることが出来たと考えられる。

§ 5. おわりに

最小土被りが7m (0.7D)、掘進対象地山はマサ土、一部分のクラウン上部に沖・洪積層が存在した今回の施

工から得られた留意事項並びに今後の課題についてまとめると次のとおりである。

- (1) 希釈水および作泥水にフィルタープレスからの余剰水を今回再利用してみたが、凝集剤 (PAC) 中の陽イオン (Al^{3+}) の残留によって泥水濾過水量が増大した。今後は、凝集剤添加量の検討および泥水への陽イオン混入対策を確立する必要がある。
- (2) 泥水圧は、流体輸送の起動時等に生じる変動幅を考慮し、少なくとも地下水圧を下まわらないように設定する必要がある。今回の施工では、変動幅が $\pm 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ ($\pm 0.02 \text{ MPa}$) 程度であった。また、送泥の負荷が大きくなる到達部近傍では、泥水流動抵抗によって切羽圧調整が一部不安定となる事例も発生した。したがって、泥水輸送設備の再検討が必要である。
- (3) 切羽面に比較的緩い地盤 (N 値30以下) が出現しても、泥水圧、裏込注入圧の適切な管理がなされれば、硬質のマサ土地盤より予測した応力解放率 α を小さくすることが可能となった。

最後に、当工事に際し、ご指導を頂いた関係各位に感謝する次第であります。

参考文献

- 1) 橋本他；シールド掘進条件を考慮した地盤変形解析，土木学会第43回年次学術講演会概要集，第III部門，pp.38～39，1988.
- 2) 森他；泥水式シールドによる砂質切羽地盤の間隙水圧とその発生メカニズム，土木学会論文集，No.430/III-15，pp.115-124，1991.