

軟弱粘性土地盤のシールド工事における二次注入に伴う地盤の変形挙動と沈下防止効果

赤木寛一¹・小宮一仁²・鈴木修一³・山崎博文⁴・森 麟⁵

¹正会員 工博 早稲田大学教授 理工学部土木工学科 (〒169 東京都新宿区大久保3-4-1)

²正会員 工博 千葉工業大学助手 工学部土木工学科

³正会員 NTT 東京設備建設総合センター土木部長

⁴正会員 日本コムシス(株) 土木本部 第2土木部工事長

⁵正会員 工博 早稲田大学名誉教授

本研究では軟弱粘性土地盤のシールド工事現場における沈下防止を目的として二次薬液注入を行い地盤の沈下挙動を実測したところ、注入を行った方が行わない場合に比べ大きな沈下を示した。また、二次注入に伴う地盤の割裂現象および粘性土の乱れに基づく圧密現象の両者を考慮した有限要素法による解析を行った。その結果、二次注入の注入範囲の違いによって周辺地盤の変形状況が異なるので、鋭敏な圧縮性に富む軟弱地盤では二次注入によって地盤沈下が助長される場合がありうることを示した。あわせて、地盤沈下防止を目的とした二次注入の設計・施工の合理的な考え方を示した。

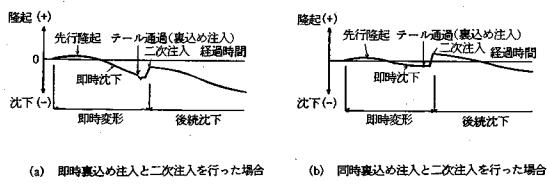
Key Words: shield tunnel, grouting, design, consolidation, settlement, cohesive soil, finite element method, disturbance

1. まえがき

都市部のトンネル工事にシールド工法が多用されるようになってから既に30年近い年月が経過した。その間シールド工事に伴う地盤の沈下を極力抑えるために数多くの研究や施工技術の開発が行われてきた。それらの成果を踏まえた掘削技術の進歩やコンピュータを利用した高度な施工管理技術の導入により、シールド工事に伴う地盤沈下はかなり小さい値に抑えられるようになってきている。しかしながら、このような最新の施工技術の導入をもってしても施工条件の厳しい軟弱地盤、特にN値がゼロに近い沖積粘性土地盤のシールド工事ではある程度の地盤沈下が発生しているのが現状である¹⁾。

軟弱粘性土地盤のシールド工事に伴う地表面変位の時間的な発生状況を模式的に示すと図-1のようになる。図-1には、セグメントのグラウトホールを利用してシールド機通過後即時に坑内からテールボイドに裏込め注入を行った場合((a) 即時注入)とシールド機のテール部分に取り付けたグラウト装置を用いてジャッキの推進に連動させて裏込め注入した場合((b) 同時注入)にその後さらに坑内からトンネル上部の地盤中に二次注入を行った時の変位状況が概念的に示されている。

図-1に示すように地表面変位は、シールド機切羽到達前に生じる先行隆起(または先行沈下)、シールド機



(a) 即時裏込め注入と二次注入を行った場合 (b) 同時裏込め注入と二次注入を行った場合

図-1 シールド工事に伴う地表面変位の発生状況の概念図

通過時に発生するテールボイドに関連する即時沈下、二次注入に伴う隆起およびその後に長期にわたって発生する後続沈下といわれる成分に大別することができる。このうち先行隆起または先行沈下の要因としては、シールド機切羽における掘削土量の過不足および掘進時のシールド機の周面摩擦が挙げられる。また、図-1(a)の即時注入の場合は裏込め注入までの時間的遅れが避けられないで、テールボイドに関連する即時沈下は図-1(b)の同時注入に比べて大きくなる。さらに、後続沈下はシールド機周辺部の粘性土のせん断変形で生じた骨格構造の乱れに起因する圧密沈下によるものが大半を占めている。これらの各要因のうち切羽に作用する圧力を適正に管理し、またテールボイドにかなりの強度をもつ瞬結性の裏込め材料をシールド機の後部から充分な量を同時注入法で注入することにより先行隆起や即時沈下はかなり小さな値に抑えられるようになってきた。

しかしながら、シールド機自身の姿勢の変化や周面の摩擦力などによる地盤の変形は避けられず、またテールボイドの応力解放も完全には防止できないので、周辺部の粘性土は必ずある程度乱される。したがって、長期にわたる圧密沈下は避けられない状況にある。このため、大きな圧密沈下が予想される軟弱粘性土地盤では、図-1に示すようにシールド機通過後にシールドトンネル坑内からトンネル背面の地盤中に瞬結性の地盤注入用の薬液を注入して上部地盤を押し上げ、その後に発生する地盤沈下を減少させる目的で二次注入が用いられている^{2)~4)}。

この地盤沈下の防止を目的とした二次注入の設計にあたっては、注入に伴う地盤の変形挙動を定量的に評価して、注入範囲、注入量、注入速度等を合理的に決定する必要がある。軟弱粘性土地盤中に注入された薬液は砂地盤のように浸透注入にならず、薬液はすべて割裂注入になり、脈状に固結して地盤を押し上げたり側方に押して地盤をせん断変形させる。そのため粘性土の骨格構造の乱れに基づく圧密沈下が発生する。したがって、二次注入による地盤沈下防止効果を定量的に評価するためには薬液の注入に伴う地盤の押し上げ効果とその後の粘土の乱れによる圧密沈下の両者を勘案する必要がある。

本研究では、 N 値がゼロに近い軟弱粘性土地盤のシールド工事現場において二次注入に伴う地盤の沈下挙動を確認するために二次注入の注入範囲を変化させた場合の地盤変位の実測結果を詳細に検討した。さらに、二次注入に伴う地盤の割裂現象および粘性土の乱れに基づく圧密現象の両者を考慮した有限要素法による解析を行った。以上の結果をもとに、軟弱粘性土地盤のシールド工事における二次注入に伴う地盤変形の発生機構について考察するとともに、二次注入の設計・施工の合理的な考え方を提示した。

2. 二次注入に伴う軟弱粘性土地盤の沈下挙動の実際

(1) 地中変位実測現場の概要

二次注入に伴う地盤の沈下挙動の実測が行われた現場は、東京都江東区の深度約30mまで N 値がゼロに近い軟弱粘性土が厚く堆積した沖積地盤中に土被り約13mの位置に外径約3mの土圧系シールド機を延長約670mにわたりて推進したものである。図-2は代表的なシールド横断面方向の地層構成であり、図中にはシールド機の位置と地中変位を測定する層別沈下計（計測点①、②、③）の設置位置が併せて示されている。

この現場では、シールド工事に伴う地盤沈下を極力小さく抑えるためにセメント系の瞬結性裏込め材料（ゲル化時間=7~8(s)、1日後の圧縮強度=20(kgf/cm²)）を

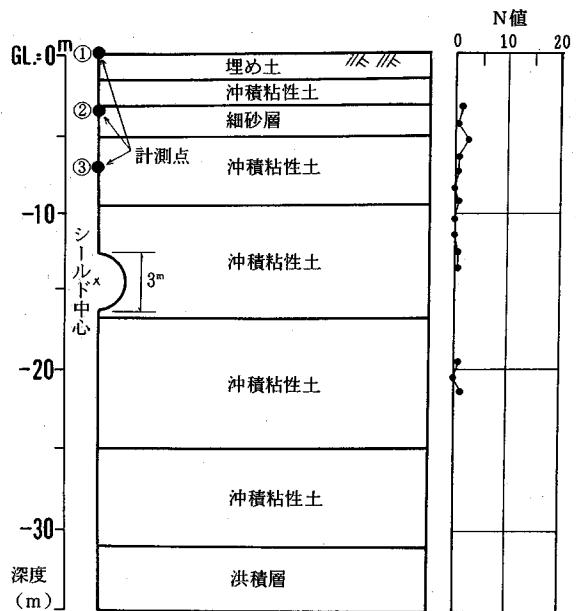


図-2 地層構成とシールドおよび計測点位置

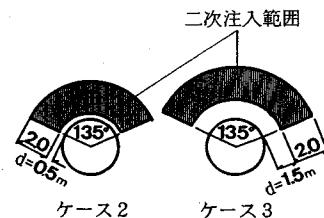


図-3 二次注入設計範囲

推進ジャッキと連動させて注入率120~150%，注入圧力3(kgf/cm²)で同時注入している。

さらに、予定路線部に近接した地下埋設物を防護するために、当該地点に到達する前に二次注入の効果確認区間が設けられた。二次注入の効果的な方法を確認するために、図-3に示すようなシールドトンネルからの離隔距離が異なる2種類の注入範囲について二次注入を行い、各場合の沈下防止効果を地中変位の実測結果をもとに評価した。地中変位は、図-4のシールドトンネル縦断面図に示すように各ケースの注入パターンを採用した注入区間に内に層別沈下計を設置して測定した。

また、二次注入はそれぞれ同じ24%の注入率であるが、注入範囲の下端からの離隔距離 d の大きいほど注入範囲が広くなるので注入量は大きくなる。なお、ケース1は比較のために二次注入を行わなかった場合である。二次注入の方法は、いずれの場合もセメント懸濁型瞬結性薬液（ゲル化時間=20(s)）を二重管ロッド工法で注入圧力5(kgf/cm²)を上限として注入した。注入時期はそれぞれケース2がテール通過後8時間30分、ケー

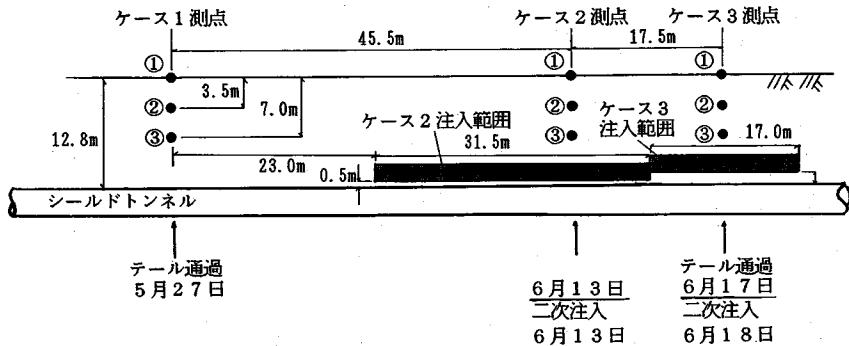


図-4 シールドトンネル縦断面図

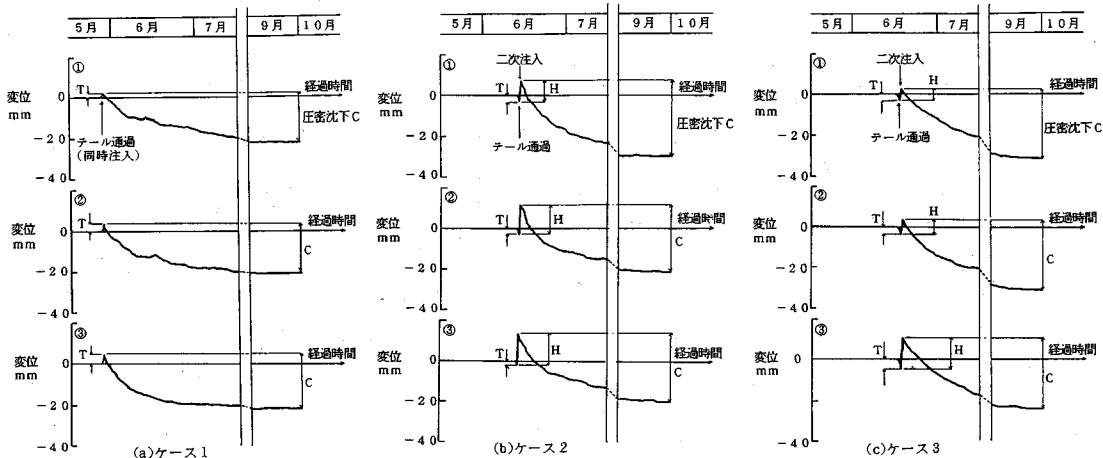


図-5 深度別の地中変位の発生状況

表-1 地中変位の計測値

変位量 (隆起+、沈下-)	テールボイド発生および 裏込め注入による変形量T(mm)			二次注入による隆起量H(mm)			後続沈下量C(mm)			総変位量T + H + C(mm)		
計測点	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
ケース 1	+ 1.5	+ 3.0	+ 4.0	-	-	-	-24.2	-24.0	-26.0	-22.7	-21.0	-22.0
ケース 2	- 2.5	- 2.5	- 2.5	+10.0	+14.0	+16.0	-37.2	-32.8	-33.3	-29.7	-21.3	-19.8
ケース 3	- 3.0	- 3.0	- 4.5	+ 5.5	+ 7.0	+15.0	-33.7	-34.5	-34.3	-31.2	-30.5	-23.8

ス3が24時間後であった。

(2) 地中変位の実測結果

図-5(a)～(c)はケース1～3に対応する深度別の地中変位の時間的な発生状況を示したものである。表-1は現場で計測されたシールド機通過直後における即時的な変形量T(mm)、二次注入に伴う隆起量に相当する値H(mm)、後続沈下量に当たる値C(mm)をケース別にとりまとめたものである。なお、後続沈下量はいずれのケースについてもケース3の二次注入終了後約3ヶ月経過した9月30日までに観測された沈下量をもとに求

めた。

これらの図表より、二次注入に伴う地盤の即時的な隆起量はトンネル近傍の計測点3がほぼ同じであることを除くと、シールドトンネルに近い位置に注入したケース2の場合の方が、シールドトンネルから離れた位置に注入したケース3の場合よりもむしろ大きくなっていることがわかる。また、二次注入を行わなかったケース1の最終沈下量が最も小さく、ケース2およびケース3を比較するとシールドトンネルから離れた位置に二次注入を行ったケース3の沈下量が最も大きくなっていることがわかる。なお、二次注入を行ったケース2およびケース

3では裏込め注入を施工していないため、二次注入時期の1日遅れたケース3ではテール通過時の即時沈下量がケース2に比べ大きく出ている。

このような二次注入の有無と注入範囲の違いによる地盤の隆起と後続沈下の発生機構の違いは、それぞれ以下のように考えることができる。まず、トンネル坑内からの二次注入に伴う軟弱粘性土地盤の隆起現象は、注入範囲の中心とシールドトンネルとの離隔距離 D によって影響を受けることが予想される。

二次注入に伴う割裂脈の発生方向は円周方向とは限らずいろいろあるが、地盤の隆起作用に主に影響するのは円周方向の割裂脈である。図-6は15cmモールドを用いて図-7に示すような境界条件のもとで行った、粘性土中への室内薬液注入実験によって得られた脈状固結体の進展状況である⁴⁾。実験では、図-7のようにモールド下端の変位を拘束しているため、地盤を隆起させる円周方向の割裂脈に対応する水平方向の割裂脈は注入孔よりも上部に大きく進展している。実際の二次薬液注入では、剛なシールドトンネル構造体は二次薬液注入に伴う地盤変位を拘束する働きをするので、図-8に模式的に示すように同量の二次注入によって注入範囲内に形成される脈状の薬液固結体の割裂脈の合計厚さ t の深度方向の進展範囲は、注入範囲の中心とシールドトンネルからの離隔距離 D によって変化すると考えられる。すなわち、この脈による地盤の強制変位は、離隔距離 D が小さい場合は注入による変形が生じやすいトンネルとの間の軟弱粘性土部分が小さいために、剛なトンネル構造体の影響が大きく、割裂脈の多くが注入範囲の中心よりも相対的に上部に進展して薬液の脈状の固結体は $t_1 > t_2$ となると考えられ、地盤の隆起量は大きい。これに対して、離隔距離 D が大きくなるとせん断変形の生じやすい注入範囲の中心からトンネルまでの軟弱粘性土部分が大きくなるので、脈状固結体は注入範囲の中心よりも相対的に下部に進展し $t_1 < t_2$ となると思われ地盤の隆起にはほとんど寄与しないことになる。

一方、後続沈下量の実測結果はケース1が最小で、トンネルからの離隔の大きい二次注入のケース3が最大である。現場の土質は、自然含水比が液性限界程度で圧縮指数は0.7~0.9の鋭敏かつ大きな圧縮性をもつ粘性土である。後述のように、同等の乱れ(せん断ひずみ)を受けた場合には、粘性土の乱れに伴う圧密沈下の大きさに関係する圧密収縮率は鋭敏比と圧縮指数の大きな粘性土ほど大きくなる。したがって、当該現場のような地盤条件の場合には、二次注入による粘性土地盤の割裂現象で生じた乱れに基づく圧密現象によって二次注入を行わない場合よりもむしろ沈下量が大きくなつたものと判断される。

また、圧密沈下量の大きさは二次注入に伴う粘性土の



図-6 割裂注入脈の形状⁴⁾

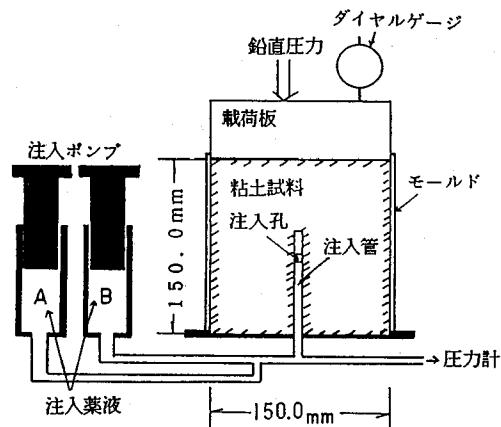
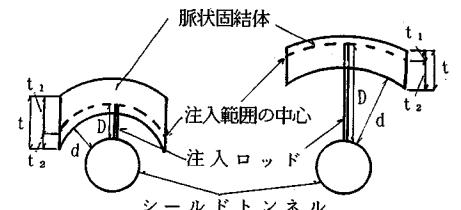


図-7 室内薬液注入実験の概要

D:注入範囲中心までの離隔距離



(a)dが小さい場合($t_1 > t_2$) (b)dが大きい場合($t_1 < t_2$)

図-8 二次注入に伴う薬液固結体の進展状況

乱れの大きさに関係するとともに乱れを受ける粘性土の影響範囲の大きさに密接に関係している。したがって、注入量が大きいケース3の場合には粘性土の乱れが増大するだけでなく、その影響範囲も大きくなる。その結果、二次注入後に発生する後続の圧密沈下量も大きくなると考えられる。なお、二次注入効果の確認区間は図-4に示したように互いに隣接しているので、図-5の各ケースの地中変位測定結果には隣接区間の二次注入等による地盤変動の影響が多少含まれている。

表-2 有限要素法解析入力データ

地層	地層名	単位体積重量 γ (tf/m ³)	弾性係数 E (tf/m ²)	ボアソン比 ν	静止土圧係数 K_0	塑性指数 I_p	敏锐比 S_e	初期間隙比 e_0	圧縮指数 C_c
第1層	埋め土層	1.70	800	0.38	0.61	—	—	—	—
第2層	沖積シルト層	1.56	315	0.48	0.92	23.7	10.0	1.70	0.940
第3層	沖積細砂層	1.80	900	0.35	0.54	—	—	—	—
第4層	沖積シルト層	1.58	500	0.47	0.89	38.4	16.0	1.62	0.671
第5層	沖積シルト層	1.58	680	0.45	0.82	40.4	23.3	1.56	0.855
第6層	沖積シルト層	1.74	1180	0.43	0.75	39.4	20.0	1.33	0.718
第7層	沖積シルト層	1.74	1460	0.41	0.69	22.2	40.5	1.33	0.491
第8層	洪積層	1.80	10000	0.35	0.54	—	—	—	—
背面二次注入薬液		1.58	5000	0.49	—	—	—	—	—

3. 有限要素法によるシールド工事に伴う粘性土地盤の変形挙動の解析

(1) シールド工事に伴う粘性土地盤の即時的な変形挙動の評価

シールド工事に伴う図-1に示した粘性土地盤の即時的な変形の要因として、シールド機のテール通過および二次注入を取り上げ、それぞれ次のような方法でモデル化し2次元有限要素法により地盤変形の全応力解析を行った。なお、シールド横断方向の地盤の変形は左右対称と考えられるので、図-9に示すような右側半断面に関する有限要素メッシュを用いて平面ひずみ状態を仮定して解析を行った。粘性土地盤は等方線形弾性体と仮定し、解析に必要な入力パラメータは現場の土質調査試験結果を参考にして表-2のような値を用いた。ヤング率Eは三軸圧縮試験時の応力とひずみの関係から求め、ボアソン比νは内部摩擦角φの値をもとにJakyの式などを利用して求めた静止土圧係数K₀をもとに $\nu = \frac{K_0}{1+K_0}$ で算定した。

テール通過直後における地盤の即時的な変形は各ケースごとに深度別の実測データがあるので、それぞれ図-9の有限要素メッシュの計測点③に対応する節点の変位が実測値と同じ値になるまでシールド外周部の節点に強制変位を与えてモデル化し解析した。同時裏込め注入を施工したケース1の場合にはシールド外周部の接点を半径方向に均等に拡大させ、また裏込め注入を施工しないケース2およびケース3の場合にはテールボイドの発生を考慮してシールド外周部の接点を半径方向に均等に収縮させた。

二次注入により地盤中に発生する割裂現象に伴う薬液の脈状の固結体にあたる要素(以下、脈状要素と呼ぶ)として、図-9中の注入箇所(ケース2に相当する)にジョイント要素を配置した。この脈状要素の節点に強制変位を与えて、図-3の注入設計面積に対して各ケースとも所定の注入率に相当する面積(注入量)を有するように押し開くことによりモデル化し解析した。この押し

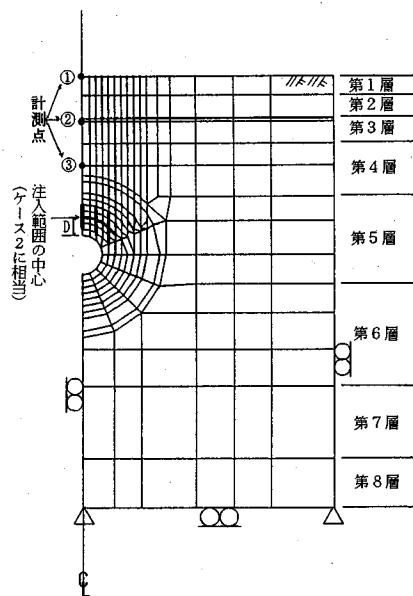


図-9 有限要素メッシュ

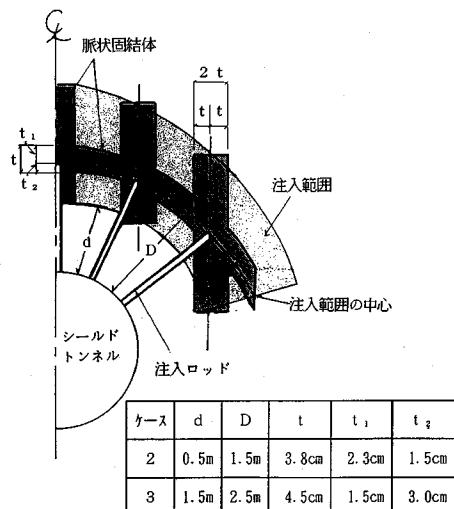


図-10 脈状要素の形状と寸法

開いた時の脈状要素の面積は、注入された瞬結性薬液が割裂注入された後、固結した脈状のホモゲル自身が地中の拘束圧力のもとで脱水収縮することを考慮して、現場の注入率 24% を 3 割低減した値を採用した⁴⁾。

なお、二次注入に伴う薬液の脈状固結体の幾何学的な形状は 2. において述べたように地層に平行な方向のみならず、多様性がある。一般に、現場の注入結果や図-6 に示した粘性土中への薬液注入の室内実験により注入孔より鉛直に割裂しそれが水平あるいは斜め方向に変化することが観察確認されている。また、割裂脈は地中の最小主応力 σ_3 に直交する方向に発生する傾向があるので、本解析では図-10 に模式的に示すように円周方向の割裂脈に加えて地中の σ_3 が一般に水平応力であることを考慮して注入範囲内の 3ヶ所に鉛直方向の割裂脈を配置した。このとき、二次注入による割裂脈は前述のように鉛直方向割裂の方が円周方向よりも生じやすいので、縦方向の脈の強制変位量 t_2 に対して円周方向に 1 とした。

また、地盤の隆起に主に関係する円周方向の割裂脈による地盤の強制変位量は 2. (2) で述べたように上部方向に t_1 とし、トンネル側に t_2 とした。たとえば、注入範囲の下端とトンネルとの離隔距離 $d=0.5(m)$ のケース 2 では次のように t_1 , t_2 の大きさを決定した。二次注入に伴い発生する割裂脈の幅 t は薬液の注入量によって決定されるが、円周方向の割裂脈による地盤の強制変位量のうちトンネル側に生じる変位量 t_2 は注入圧力によるトンネルと割裂脈との離隔に存在する粘土の非排水変形量で決まる。簡単のために、離隔に存在する粘土の変形状況を図-11 に示すような 1 次元弾性問題でモデル化して t_2 の大きさを求めた。すなわち、厚さ D (=注入範囲の下端との離隔距離 d +注入範囲幅の半分: 1(m)) の弾性体の上部に圧力 p_z が作用した場合、この弾性体の鉛直方向の変位量 $\Delta d=t_2$ は次式のように求めることができる。

$$\Delta d = \varepsilon_z \cdot D = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{E(1-\nu)} p_z \cdot D \quad (1)$$

ここに、 ε_z は z 軸(鉛直)方向のひずみ(圧縮: 正), E は弾性係数および ν はポアソン比である。したがって、ケース 2 の注入範囲とトンネルとの離隔に存在する粘土の弾性係数($E=680 \text{ tf/m}^2$), ポアソン比($\nu=0.45$)および注入圧力($p_z=25(\text{tf/m}^2)$)によってトンネル側に注入される脈幅 t_2 は決まる。なお、現場では $50(\text{tf/m}^2)$ を注入圧力の上限値としていたが、実際には注入位置での土被り圧よりもやや大きい値で割裂するので上記の値を p_z として用いた。一方、 t_1 は全体の注入量 t から上記の t_2 を差し引くことで求められる。

また、ケース 3 では前章で示したトンネルと注入範囲の中心との離隔距離 D の影響を考慮して、トンネル直

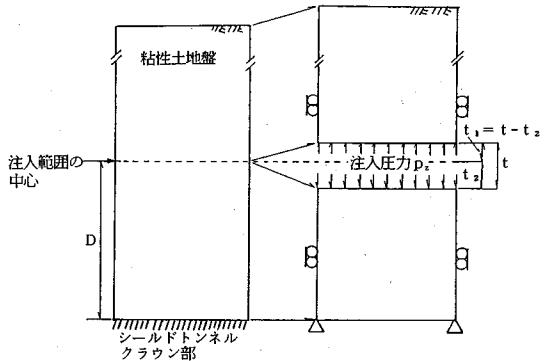


図-11 強制変位量の求め方

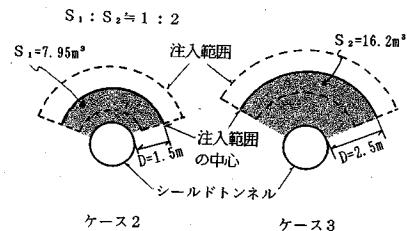


図-12 粘性土の面積比

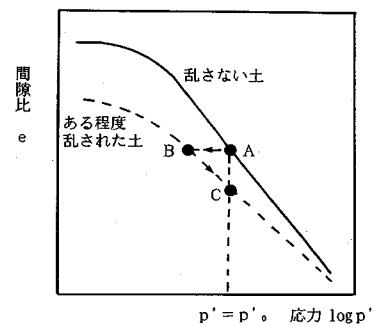


図-13 粘性土の乱れに基づく圧密現象

上部と注入範囲との間に存在する粘性土の面積比(ケース 3 ではケース 2 の 2 倍、図-12 参照)だけ t_2 の強制変位量を大きくし、 t_1 は残りの注入量に対応する値にした。

以上のようにして算定し、実際に解析に用いた強制変位量 t_1 および t_2 , t の値は図-10 中の表に示すとおりである。

(2) 粘性土地盤の後続沈下量の評価

図-1 の後続沈下と粘性土の乱れによる圧密現象の関係について説明する。図-13 は粘性土の乱れに基づく圧密現象の発生機構を圧密試験の試料の乱れに基づく e - $\log p'$ 曲線の変化を用いて概念的に示したものである。図の経路 AB がシールド工事のテールボイド発生や二次注入に伴う割裂現象による正規圧密状態の粘性土の非

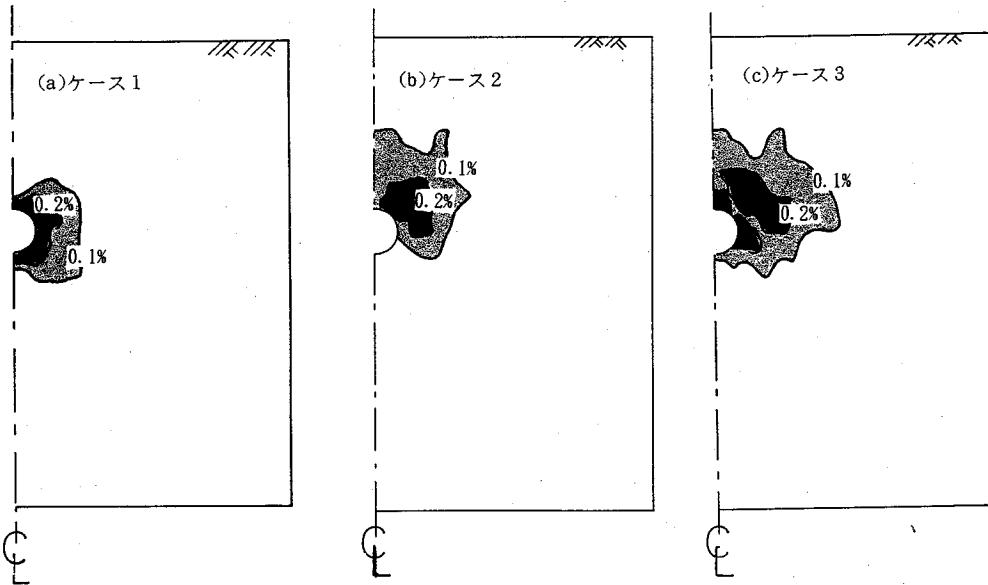


図-14 地中の最大せん断ひずみ γ_{\max} (%) の分布状況

排水せん断変形に起因する乱れの発生過程であり、経路 BC がその後に後続沈下として観測される圧密沈下の発生過程に相当する。経路 BC に沿った粘性土の圧密に伴う圧密収縮率 α は各種の不搅乱粘性土に関する実験結果に基づいて、次式のように経路 AB で生じた最大せん断ひずみ γ_{\max} (%) を用いて次式(2)で求めることができるなどを既に示した⁵⁾。

$$\alpha = \frac{0.3 \cdot C_c}{1+e_0} \log(k \cdot \gamma_{\max} + 1) \quad (2)$$

ここに、 e_0 は粘性土の初期間隙比、 C_c は粘性土の圧縮指數である。また、式(2)中の k は粘性土の乱れやすさに關係するパラメータであり、粘性土の塑性指數 I_p と鋭敏比 St を用いて次式で表される。

$$k = 0.33 \cdot I_p^{-0.37} \log St \quad (3)$$

したがって、同等の乱れ(せん断ひずみ)を受けた場合には鋭敏比と圧縮指數が大きい粘性土ほど圧密収縮率 α は大きくなり、大きな圧密沈下が発生することになる。

(3) 2次元有限要素法による乱れに基づく圧密沈下量の算定

粘性土地盤の乱れに基づく圧密沈下量の算定にも2次元有限要素法を用いた。Christian⁶⁾によれば、平面ひずみ条件下の飽和粘土の圧密現象に関する有限要素解析のための剛性方程式は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} K_N & K_N \\ K_N^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_N \\ H_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_N \\ K_B \cdot \alpha \cdot e_N \end{bmatrix} \quad (4)$$

ここに、

$$[K_N] = [A]^{-1,T} \cdot \int_V [B]^T [D] [B] dv \cdot [A]^{-1} \quad (5)$$

$$[K_{N'}] = [A]^{-1,T} \{G\} K_B \cdot a \quad (6)$$

$[A]^{-1}$: 形状関数マトリクス、 $[B]$: ひずみマトリクス、 $[D]$: 応力-ひずみマトリクス、 a : 要素面積、

$$\{G\} = \{0, 1, 0, 0, 0, 1\}$$

$$K_B = E/3(1-2\nu) \quad (E: ヤング率, \nu: ポアソン比),$$

$\{v_N\}$: 節点変位ベクトル、

$$\{H_N\} = \{u_N\}/K_B (\{u_N\}: 過剰間隙水圧ベクトル),$$

$$\{P_N\} : 節点外力ベクトル, \{e_N\} : 体積ひずみベクトル$$

ここで、前節(2)で示した粘性土の乱れに基づく圧密収縮率 α は(1)の即時変形解析で求められる各要素の最大せん断ひずみ γ_{\max} (%)から各要素ごとに式(2)を用いて定まる。すなわち、式(4)の各要素の過剰間隙水圧ベクトル $\{u_N\}$ がゼロの圧密沈下終了時に対応する体積ひずみベクトルが $\{e_N\} = \alpha$ で直接決まることになる。

したがって、これらの条件下で式(4)の連立方程式を解くことにより粘性土の乱れに基づく圧密沈下終了時の各節点変位量 $\{v_N\}$ を求めることができる。なお、テール通過時と二次注入に伴う粘性土地盤の即時変形による各要素の最大せん断ひずみは個別に求めることができが、圧密収縮率 α の算定に用いる値はそれぞれの最大せん断ひずみを足し合わせたものを用いた。

(4) 解析結果

図-14(a)～(c) はケース1から3について、有限要素法解析で得られた地盤の即時変形発生時の地中の最

表-3 有限要素法解析結果と計測値の比較

変位量 (隆起+、沈下-)	テールボイド発生および 裏込め注入による変形量T(mm)			二次注入による隆起量H(mm)			圧密沈下量C(mm)			総変位量T+H+C(mm)		
	計測点 ①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
ケース 1 計測値 解析値	+ 1.5 + 3.0 + 3.5	+ 3.0 + 3.5	+ 4.0 + 4.0	-	-	-	-24.2 -22.2	-24.0 -21.6	-26.0 -19.8	-22.7 -19.2	-21.0 -18.1	-22.0 -15.8
ケース 2 計測値 解析値	- 2.5 - 1.9	- 2.5 - 2.2	- 2.5 - 2.5	+10.0 + 9.7	+14.0 +11.4	+16.0 +14.2	-37.2 -40.3	-32.8 -40.2	-33.3 -38.0	-29.7 -32.5	-21.3 -31.0	-19.8 -26.3
ケース 3 計測値 解析値	- 3.0 - 3.5	- 3.0 - 3.9	- 4.5 - 4.5	+ 5.5 + 4.8	+ 7.0 + 6.0	+15.0 + 8.6	-33.7 -41.3	-34.5 -40.7	-34.3 -37.8	-31.2 -40.0	-30.5 -38.6	-23.8 -33.7

大せん断ひずみ γ_{max} (%) の分布状況である。なお、ケース 1 ではテール通過時の即時変形に伴う最大せん断ひずみの分布が示されており、ケース 2 およびケース 3 は二次注入のみによるひずみの分布状況が示されている。この最大せん断ひずみ γ_{max} の大きさが前節で述べたように、粘性土の乱れに基づく圧密沈下量に直接寄与することになる。これらの図からわかるように、ケース 1 のテール通過時の即時変形に比較して、ケース 2 およびケース 3 の二次注入を行ったときにはトンネル周辺地盤的最大せん断ひずみは大きくなっている。また、ケース 2 とケース 3 を比較すると注入範囲の中心とシールドトンネルからの離隔距離が大きくなると、2. で述べたようにたとえば 0.1(%) を越える γ_{max} の生じる領域がシールドトンネル側方下部方向に実際に拡大していることがわかる。

表-3 は今回行った有限要素法解析結果をとりまとめ、現場の深度別の変位量を測定した位置での実測値と解析値を比較したものである。現場の 24(%) の注入率に対応した二次注入による地盤の隆起量の解析値は実測値と比較すると、ケース 3 の計測点 3 の隆起量の計測値が解析値の 2 倍近い値であることを除くといずれのケースについても比較的よく適合した結果が得られている。すなわち、図-10 のように脈状要素をモデル化することによって実測値とほぼ同等の変位量が得られていることから、2. で述べた二次注入範囲の中心とトンネルとの離隔距離に応じた薬液の脈状固結体の進展状況の違いに関するモデル化が妥当なものであると判断される。

また、圧密沈下量の解析値は地中変位観測の行われた 9 月 30 日迄に圧密のほぼ終了したケース 1 と 2 は実測値と適合した結果が得られているが、圧密進行中と思われるケース 3 ではいずれも解析値の方が大きい値となっている。

4. 軟弱粘性土地盤のシールド工事における二次注入に伴う地盤の変形と沈下防止効果

今回、二次注入が行われた現場では二次注入による地

盤沈下防止効果は確認されず、むしろ逆に粘性土の乱れによる圧密沈下を助長する結果となった。粘性土の乱れに基づく圧密現象は前述の式(2)からわかるように、同等の乱れ(最大せん断ひずみ)を受けた場合には粘性土の鋭敏比および圧縮指数が大きいほど大きな圧密沈下が発生することになる。したがって、この現場のように自然含水比が液性限界に近く練返すと液状になりかつ圧縮指数が 1 に近い地盤では、二次注入は沈下防止工法としてはむしろ逆効果を生じる場合があることに注意すべきである。

しかしながら、たとえば圧縮指数が 0.5 程度の地盤であれば乱れによる圧密沈下量は約半分になるので、ケース 2 と同等の二次注入を行っても注入による地盤の押し上げ効果を勘案すると最終地盤沈下量の大きさをかなり小さく抑えることができる。実際に、やや鋭敏比の小さい圧縮指数が 0.64~0.73 の粘性土地盤で同種の二次注入を行った現場の沈下実測結果によると、二次注入によって沈下量が増大するような結果にはなっていない。なお、この場合でもケース 3 のようにシールドトンネルから離れた位置に注入を行うと、ほとんど沈下防止効果がないことは同様である。

本研究およびこれまでに得られた地盤注入技術に関する各種の知見に基づいて、軟弱粘性土地盤のシールド工事に伴う地盤沈下防止を目的とした二次注入の設計・施工にあたっての留意点を列挙すると以下のとおりである。

(1) 注入された薬液を所定の設計範囲内にできるだけ固結させることができが基本的前提条件である。粘性土地盤の薬液注入では脈状の割裂注入になるので、所定の設計範囲内で薬液を固結させることは必ずしも容易ではない。このために薬液の選択、注入方法について以下のような条件を満足させる必要がある。

a) 薬液の選択：10~20(s) 程度のゲル化時間と有する瞬結型で離漿水の少ないセメント懸濁型薬液が望ましい。

b) 薬液注入量および注入速度：有効な二次注入を行うためには、薬液注入量は注入範囲に対して少なくとも

15(%)以上の注入率が必要である⁴⁾。また、注入速度はできるだけ小さくし、割裂脈が遠くまで伸びないようとする。

c) 注入時期：シールド通過直後は一般にテールボイドの発生などによってトンネル周辺部の応力が解放状態にあるので、割裂しやすくかつ割裂脈が遠くに伸びやすい傾向がある。したがって、シールド通過直後よりも周辺地盤の応力が静止土圧状態近くに落ちついた数日後の方針注入時期としては望ましいと言える。実際に、表3の注入時期が遅いケース3では計測点③の注入による隆起量が大きい。

(2) 注入範囲の中心とトンネルとの離隔距離に応じて、薬液の割裂脈が地盤に与える強制変位状態の異なることが予想される。離隔距離が大きい場合には、注入による地盤の押し上げ効果を期待することはできない。その後の圧密沈下も増大する。このため、注入範囲はセグメント構造に悪影響を与えない範囲でセグメントに接近した位置が望ましい。

5. 結論

本研究では、 N 値ゼロに近い軟弱粘性土地盤のシールド工事現場における地中変位の実測結果に基づいて二次注入に伴う地盤の変形挙動を詳細に調査・確認した。あわせて、二次注入に伴う地盤の割裂現象および粘性土の乱れに基づく圧密現象の両者を考慮した有限要素法による解析を行った。これらの結果に基づいて、軟弱粘性土地盤のシールド工事における二次注入の地盤沈下の抑制機構について考察するとともに二次注入の合理的な考え方を提示した。本研究で得られた主な成果をとりまとめると、以下のとおりである。

(1) 液性限界に近い自然含水比をもつ鋭敏で圧縮指標が1に近い地盤で二次注入を行うと、注入に伴う粘性土の乱れに基づく圧密沈下量が大きくなつて沈下防止に当たつて逆効果になる場合がある。

(2) 二次注入の注入範囲とシールドトンネルとの離

隔距離が大きくなると、注入に伴う地盤の押し上げ効果が期待できないのみならず粘性土の乱れが発生する領域が大きくなるので圧密沈下量が増大する。このため、注入範囲はセグメント構造に悪影響を与えない範囲でセグメントに接近した位置が望ましい。

(3) 薬液の割裂脈が設計範囲にできるだけおさまるようにすべきである。このためには、薬液の種類、ゲル化時間および注入速度を適切に選択する必要がある。また、注入時期としてはシールド通過直後より数日後の方が効果的である。

(4) 二次注入に伴う粘性土地盤の割裂現象に伴う脈状の注入形状を実状に近い形にモデル化することによって、有限要素法を用いて二次注入に伴う粘性土地盤の即時的な変形とその後の圧密沈下現象に関して現場の状況に対応した解析を行うことができる。

参考文献

- 1) 土質工学会 Underground Construction in Soft Ground 国内委員会：シールド小委員会報告、山留めとシールド工事における土圧・水圧と地盤の挙動に関するシンポジウム発表論文集, pp.67-106, 土質工学会, 1992年5月。
- 2) 森 麟、赤木寛一、鈴木 仁：軟弱粘性土地盤でのシールド工事における裏込め注入および2次注入の沈下防止効果について、トンネルと地下、第14巻11号, pp.25-31, 1983年11月。
- 3) 森 麟他：軟弱粘土層での坑内二次注入を実施した近接並列シールド掘進時の地盤計測（その2）、第23回土質工学研究発表会、昭和63年度発表講演集, pp.1921-1924, 1988年6月。
- 4) Akagi, H. and K. Komiya : Effects of Secondary Injection During Shield Work in Soft Clay, Proc. Ninth ARCSMFE, Vol.1, pp.303-306, 1991.
- 5) 森 麟、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355号, pp.117-125, 1983年。
- 6) Christian, J.T. : Undrained Stress Distribution by Numerical Methods, Proc. ASCE, Vol.94, No.SM 6, pp.1333-1345, 1968.

(1993.8.2受付)

DEFORMATION DUE TO SECONDARY INJECTION DURING SHIELD WORK IN SOFT CLAYEY GROUND AND ITS SINKAGE PREVENTION EFFECTS

Hirokazu AKAGI, Kazuhito KOMIYA, Shuichi SUZUKI
Hiromi YAMAZAKI and Akira MORI

The effects of secondary injection during shield work on the prevention of ground subsidence were examined, using the measurement results of ground displacement during shield work in soft clayey ground. In order to investigate the deformation of soft ground during shield work, the finite element analyses were carried out by taking account of the consolidation of soft clayey soil due to the disturbance of micro-structure of soil. In case of soft clayey soil, the secondary injection could become the cause of ground subsidence because of the disturbance of micro-structure of soil associated with the fracturing phenomena during secondary injection. The guidelines for the design and execution procedures of secondary injection in soft clayey ground were also proposed.