

III-32 軟弱粘性土地盤のシールド工事における二次薬液注入に伴う地盤の変形状況について

早稲田大学理工学部 正員 ○赤木 寛一 正員 森 麟
N T T 下山 泰雄 早川 一成
日本コムシス㈱ 山崎 博文

1. まえがき

二次注入の設計、施工にあたっては、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。しかしながら、軟弱粘性土地盤中に注入された薬液は脈状の割裂注入形態になり、そのため薬液注入後に粘性土の割裂現象による骨格構造の乱れに基づく圧密沈下が発生するので、二次注入に伴う地盤の変形状況の合理的に評価するためには二次注入に伴う地盤の沈下挙動を詳細に調査する必要がある。

本研究は、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ものである。

2. 二次注入に伴う軟弱粘性土地盤の沈下挙動の実験

(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験が行われた現場は、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にわたって推進したものである。図1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検討するために、図2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1に示す位置に各ケースの注入パターンを採用した注入区間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、離隔距離の大きいほど注入範囲が広が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、ケース3が24時間後であった。

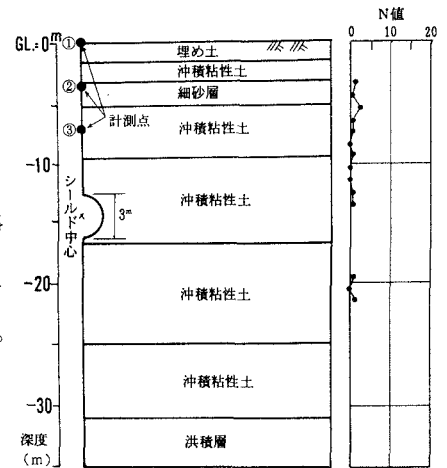


図1 地層構成とシールドおよび計測点位置

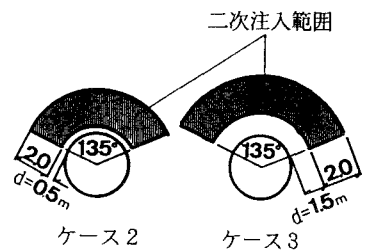


図2 2種類の二次注入設計範囲

(2) 地中変位の実測結果

図3(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はこれらの図より読みとったシールド機通過直後のテールボイド発生および同時裏込め注入に伴う変形量、二次注入に伴う隆起量に相当する値、後続沈下量として観測される粘性土の乱れに基づく圧密沈下量に当たる値をケース別にとりまとめたものである。なお、後続の圧密沈下量はいずれの

表1 地中変位の計測値

変位量 (隆起+, 沈下-)	即時変形量T(mm)			二次注入による隆起量H(mm)			圧密沈下量C(mm)			総沈下量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

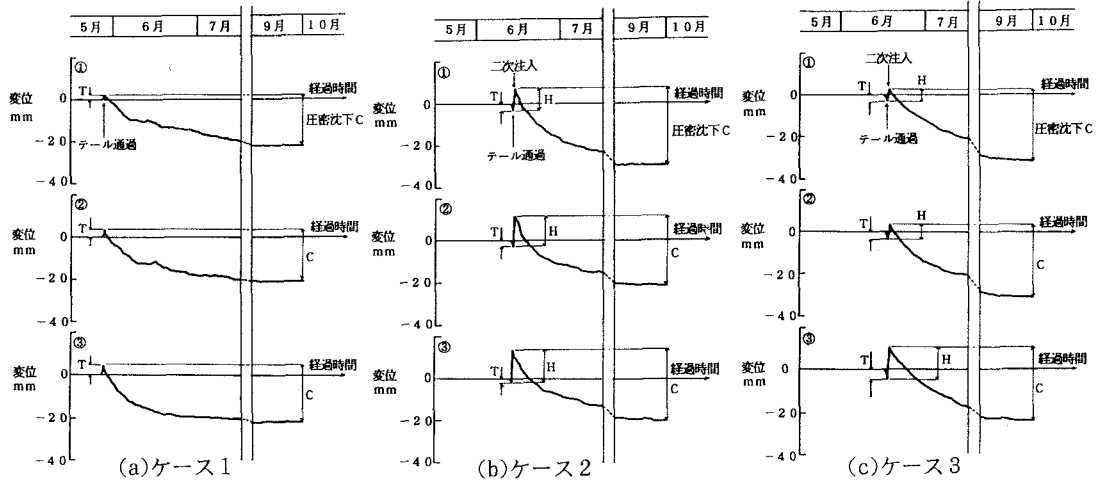


図3 深度別の地中変位の時間的な発生状況

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。このような二次注入の注入範囲の違いによる地盤の隆起と二次注入の有無による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、注入範囲とシールドトンネルとの離隔距離によって影響を受けることが予想される。すなわち、図4に模式的に示した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厚さ t の深度方向の進展範囲は注入位置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。割裂脈の発生方向は水平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水平方向の割裂脈である。この脈による地盤の強制変位は、離隔距離 d が小さい場合はトンネルとの間に存在する注入に伴って変形が生じやすい軟弱粘性土部分の面積(体積)が小さいために、剛なトンネル構造体に支えられて薬液の脈状の固結体は注入位置よりも相対的に上部に進展して $t_1 > t_2$ となるので、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からトンネルまでの軟弱粘性土部分の面積(体積)が大きくなるので、固結体は注入位置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、後続の圧密沈下量はケース1が最小で、トンネルからの離隔が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の鋭敏でかつ大きな圧縮性をもつ粘性土である。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¹⁾。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ったものと判断される。また圧密沈下の大きさは二次注入に伴う粘性土の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、注入量が多いケース3の場合には粘性土の乱れが増大するだけでなく、その影響範囲も上記のように薬液の脈状固結体が $t_1 < t_2$ となり軟弱粘性土層深部方向に進展するので大きくなる。その結果、二次注入後に発生する圧密沈下量も大きくなると考えられる。

3. まとめ

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。結果、地盤沈下の防止を目的とした二次注入を有効に行うために注意を要する点が明らかになった。すなわち、注入範囲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うえ後続の圧密沈下も増大する。このため、注入位置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方が望ましい。

参考文献 1) 森・赤木: 土木学会論文報告集, 第355号, p. 117~125, 1983