

III-33 有限要素法によるシールド工事における二次薬液注入に伴う軟弱粘性土地盤の変形挙動解析

早稲田大学理工学部 正員 赤木 寛一 正員 ○小宮 一仁 正員 森 麟
N T T 加藤 勇 早川 一成

1. まえがき

地盤沈下の防止を目的とした二次薬液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、注入量等を決定する必要がある。著者らの一部は既に、軟弱粘性土地盤の二次薬液注入に伴う地盤の変形挙動を、注入に伴う地盤の隆起、土の乱れに基づく圧密現象および薬液ホモゲルの脱水収縮現象を考慮した有限要素法解析によって評価できることを示した⁽¹⁾。

そこで本研究では、二次薬液注入の注入箇所を変化させた実際の二次薬液注入工事に伴う軟弱粘性土地盤の変形挙動の有限要素法解析を行い、現場での実測結果と解析結果との定量的な比較によって現場の状況に対応した解析が可能であることを示す。

2. 解析の概要

解析の対象とした工事は、東京都江東区の軟弱粘性土地盤中で、の土圧系シールド工事(土被り=13m、シールド外径=3m)において施工された二次薬液注入である。現場では二次薬液注入の効果的な方法を検討するために図1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ケース2およびケース3の2種類の注入範囲について注入率24%で二次薬液注入を行い、それぞれ図2に示す地表面①および地中の複数の点②、③の変位状況を層別沈下計によって計測した。なお、ケース1は比較のために二次薬液注入を行わなかった場合である。

シールド工事に伴う粘性土地盤の即時的な変形の要因として、テールボイド、裏込め注入および二次薬液注入を取り上げ、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2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、解析の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1のような値を用いた。

テールボイドと裏込め注入による地盤の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2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を等方的に強制変位させることによりモデル化し解析した。

図1の注入範囲内に注入された薬液は脈状の割裂注入形態になると考えられるので、解析では薬液脈状固結体をモデル化した要素(以下、脈状要素と呼ぶ)として、注入範囲の中央部の注入箇所(図2はケース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1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割裂現象に伴う薬液脈状固結体を実状に近い形でモデル化し解析した。この押し開いた時の脈状要素の面積は、注入された薬液が固結した後にホモゲル自身が地中の拘

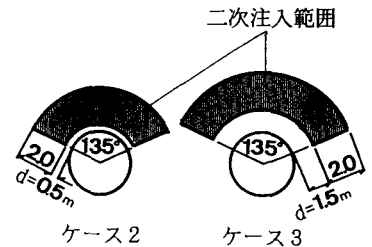


図1 2種類の二次薬液注入設計範囲

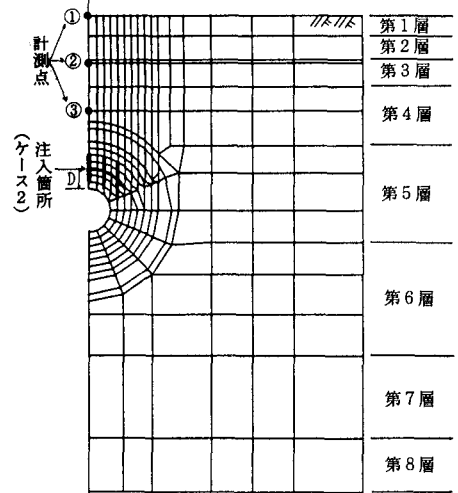


図2 有限要素メッシュおよび計測点位置

表1 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)	ポアソン比 ν	静止土圧係数 K_0	塑性指数 I_p	鋭敏比 S_c	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	—	—	—	—	—

表2 二次薬液注入に伴う地盤変形の計測値と解析値の比較

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)		
	①	②	③	①	②	③	①	②	③	①	②	③
ケース1	計測値	+1.5	+3.0	+4.0	—	—	—	-24.2	-24.0	-26.0	-22.7	-21.0
	解析値	+3.0	+3.5	+4.0	—	—	—	-22.2	-21.6	-19.8	-19.2	-18.1
ケース2	計測値	-2.5	-2.5	-2.5	+10.0	+14.0	+16.0	-37.2	-32.8	-33.3	-29.7	-21.3
	解析値	-1.9	-2.2	-2.5	+9.7	+11.4	+14.2	-40.3	-40.2	-38.0	-32.5	-31.0
ケース3	計測値	-3.0	-3.0	-4.5	+5.5	+7.0	+15.0	-33.7	-34.5	-34.3	-31.2	-30.5
	解析値	-3.5	-3.9	-4.5	+4.8	+6.0	+8.6	-41.3	-40.7	-37.8	-40.0	-38.6

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2.4%を3.0%低減した値を採用した⁽¹⁾。

一般に薬液注入における割裂脈は、初め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、現場の注入結果や別途行った15cmモールドを用いた粘性土中への薬液注入の室内実験により観察確認されている⁽¹⁾。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、地中の σ_3 が一般に水平応力であることを考慮して脈状要素の形状は図3のように鉛直方向の脈の強制変位量2に対して水平方向1とした。

一方、図3に示すように地盤の隆起に主に関係する水平方向の脈状固結体による地盤の強制変位量はトンネル側に t_2 、逆方向に t_1 とし、ケース2では表2の隆起量の実測値とできるだけ適合するように t_1 と t_2 の比を3:2とした。なお、この比率は筆者らの一部が別途行った二次薬液注入の解析例で用いたものと同じである。⁽²⁾ また、地中変位の実測結果によると注入範囲とトンネルとの離隔距離 d が大きくなると注入時の注入圧力によるシールドトンネルと注入箇所との間に存在する粘性土の変形が大きくなると考えられるので、ケース3ではシールドトンネルと注入箇所との離隔 D に存在する粘性土の面積比（図4参照。ケース3ではケース2の2倍）だけ t_2 の強制変位量を大きくした。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3中に示すとおりである。

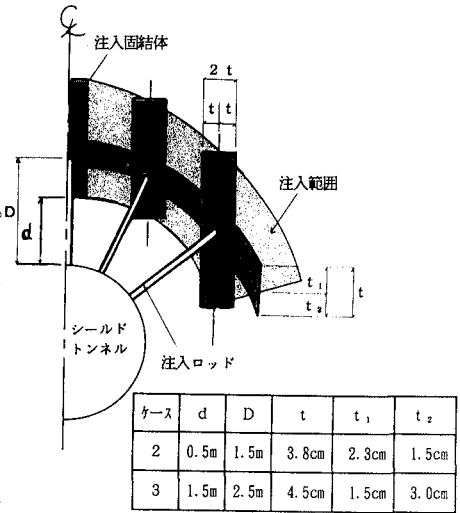


図3 脈状要素の形状

3. 解析結果

表2は今回行った有限要素法解析結果をとりまとめて、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2.4%の注入率に対応した二次薬液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良好な適合した結果が得られている。すなわち、図3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. で述べた注入箇所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。なお、圧密沈下量の解析値は地中変位観測終了時点で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かなり大きい値となっている。

4. まとめ

二次薬液注入の注入箇所を変えた工事における現場での計測値と解析値の比較の結果、二次薬液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、土の乱れにもとづく圧密現象を考慮した有限要素法を用いて二次薬液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が可能であることが示された。

（参考文献）(1)Akagi H., K.Komiya: Proc. of 9th ARCSMFE, Vol.1, p.303~306, 1991

(2)森・赤木・鈴木：トンネルと地下、第14巻11号、p.25~31、1983

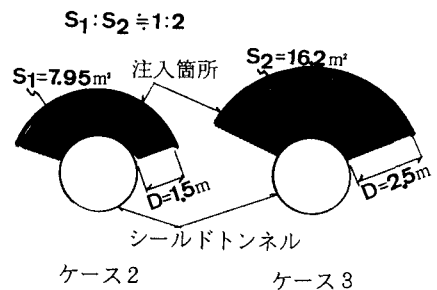


図4 離隔Dに存在する粘性土の面積比