

土压平衡盾构穿越含砂土层地表 变形规律与控制技术

胡长明, 张文萃, 梅源, 贡少瑞, 崔耀

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:以西安地铁二号线某区间工程土压平衡盾构施工为背景, 基于监测数据的统计结果, 结合现场渣土改良试验, 研究了土压平衡盾构穿越黄土地层及全断面砂层时地表变形的主要影响因素及其控制技术, 并根据计算结果给出了土压平衡盾构穿越含砂土层过程中的土舱压力、出土量、注浆压力和注浆量等变形主要影响因素的经验值。结果表明, 土压平衡盾构穿越含砂土层过程中, 表现出了较强的不适应性, 但经膨润土泥浆对渣土进行改良后, 盾构开行顺利, 施工进度较快。当土舱压力、出土量、注浆压力和注浆量分别控制在 140~260 kPa、54~56 m³、210~300 kPa 和每环 4 m³ 时, 土压平衡盾构表现出了较好的适应性。相关结论可为类似工程解决土压平衡盾构对穿越土层的不适应问题提供参考。

关键词:土压平衡盾构; 全断面砂层; 非适应性; 渣土改良; 变形控制

中图分类号: TU 94

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2013)03-0341-07

目前, 盾构施工方法已经广泛应用于地下隧道工程建设。其中, 李曙光^[1]对软土地层土压平衡盾构掘进过程中地表沉降影响因素进行了分析; 唐益群^[2]总结了土压平衡盾构掘进软土地区砂性土层时改善施工条件的方案; 谭忠盛^[3]研究了软硬不均地层复合盾构掘进技术及渣土改良技术。但对于黄土地区含砂土层条件下土压平衡盾构掘进过程中的土体变形控制技术及解决土层不适应问题的研究还很少见^[4-8]。

西安市位于黄河流域中部的关中盆地, 主要地层由黄土地层和砂层构成。目前, 西安地铁二号线作为国内首条在黄土地质条件下修建的地铁隧道已经开始施工。在其施工过程中, 某些区间段遇到了穿越砂层的情况^[9]。本文通过现场渣土改良试验, 结合监测结果分析, 开展了对土压平衡盾构穿越砂层不适应性问题的研究。同时计算得出了土压平衡盾构穿越含砂土层时土舱压力、出土量、注浆量和注浆压力等影响因素的经验值, 为类似工程解决土压平衡盾构对穿越土层的不适应问题提供参考。

1 试验及监测方案

土压平衡盾构适用于粘性土层, 对砂性土表现出较强的不适应性, 主要表现在:

(1) 地表沉降控制难度较大。由于砂层成拱效应较差, 上部土压不能得到保证, 刀盘上端很容易塌空, 对前方土体扰动过多;

(2) 砂质土层导致刀盘磨损、掘进困难。由于砂性土摩擦阻力大、标贯击数高, 当切削下来的渣土充满土舱和螺旋机内时, 将会造成刀盘扭矩和螺旋输送机扭矩增大, 直接降低掘进速度甚至无法推进。

由于西安地铁二号线北客站~北苑站区间段临时改线, 新的设计线路中含有一段砂质土层, 此时土压平衡式盾构机已经开始掘进, 无法替换为适合于砂砾土层的泥水盾构。因此开展渣土改良试验研究, 使土压平衡式盾构适用于砂质土层十分必要。

1.1 室内试验方案

(1) 膨润土泥浆优化试验: 按照水与膨润土的质量比为 6:1、8:1、10:1、12:1、14:1, 配制膨润

收稿日期: 2012-10-16 修改稿日期: 2013-05-05

基金项目: 陕西省科技攻关计划项目(2011k10-20); 包头市科技计划项目(2011x1006)

作者简介: 胡长明(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 从事土木工程建设与管理方向的研究。

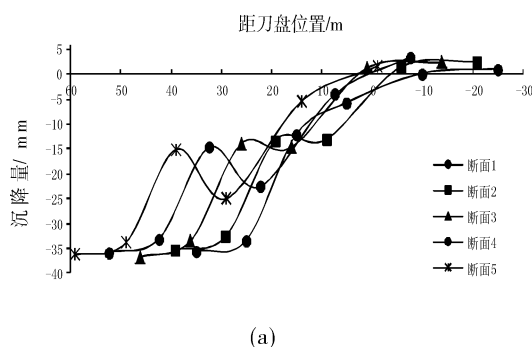


图 2(a) 1 号试验段纵向地表沉降实测曲线

Fig. 2(a) Longitudinal ground settlement curve in test section 1

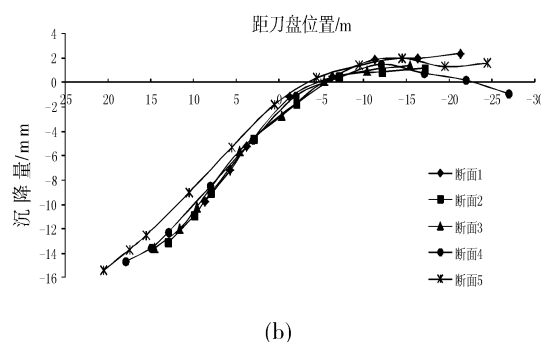


图 2(b) 2 号试验段纵向地表沉降实测曲线

Fig. 2(b) Longitudinal ground settlement curve in test section 2

图 2(a) 中的 1 号试验段处于渣土改良初期, 最终沉降量较大. 随着膨润土泥浆对土体进行改良, 从图 2(b) 中可以看到, 2 号试验段地表沉降量明显降低, 渣土改良的效果趋于明显.

(2) 横向地表监测曲线. 选取 3、4、5 号试验段的监测断面, 绘制出地表横向变形的沉降槽曲线如图 3(a)~(c). 由沉降数据曲线分析可知:

单线隧道各沉降槽曲线基本沿隧道轴线呈对称分布, 轴线处的沉降量最大. 横向上的地表沉降分布在以线路中心线为对称轴的 8 倍洞径左右. 其中, 主要影响区在距隧道轴线一侧约 1 倍洞径范围内, 距轴线 1~2.5 倍洞径的地表范围为次要沉降区, 两部分沉降槽体积约占总沉降槽体积的 70%.

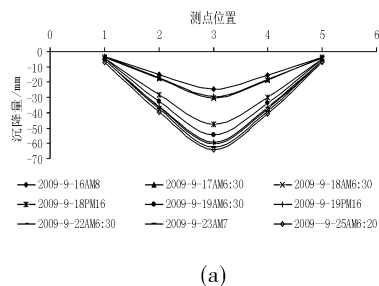
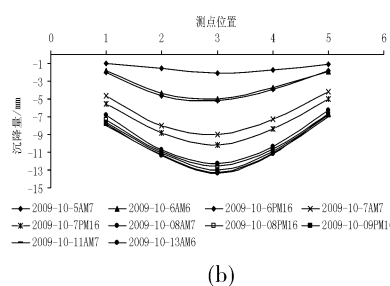
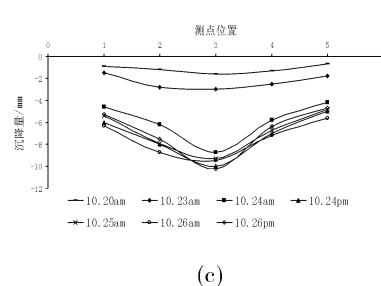
图 3(a) 3 号试验段横断面地表沉降曲线
Fig. 3(a) Cross-sectional surface subsidence curve in test section 3图 3(b) 4 号试验段横断面地表沉降曲线
Fig. 3(b) Cross-sectional surface subsidence curve in test section 4图 3(c) 5 号试验段横断面地表沉降曲线
Fig. 3(c) Cross-sectional surface subsidence curve in test section 5

图 3(a) 的地表沉降较大, 这是有于土舱压力偏小导致的. 通过适当提高土舱压力, 在图 3(b) 中可以看出, 沉降速率趋于稳定, 效果良好. 这说明适当提高土舱压力有助于减少地表沉降.

图 3(c) 的沉降量最小, 这是由于在 5 号试验段盾构施工过程中采取了建立土舱压力、维持掌子面稳定和及时跟进注浆等一系列措施. 通过监测数据可知, 这些措施对纵向和横向的土体变形都起到了良好的控制作用. 因此, 适当改变土舱压力和注浆量都会对土体变形产生较大影响.

3 施工期变形控制措施分析

3.1 控制措施

(1) 土舱压力. 从理论上讲, 如果盾构刀盘面所提供的压力和原静止土压力相当, 则周围土体受到的扰动很小, 地面不会出现很大沉降^[10]. 如果盾构刀盘面提供的压力超过原静止土压力, 前方土体处于被动土压力状态, 因竖直方向的泊松效应致使土体出现向上位移, 发生地面隆起. 反之, 则会导致地面沉降. 土舱压力的设定是一个动态过程, 应根据具体施工模式和施工环境进行调整. 采用土压平衡模式结合渣土改良的方式时, 应计算盾构前方的静止土压力与预备压力之和作为土舱压力的设定值; 采用欠压快速掘进, 跟紧注浆的方式时, 则应计算盾构前方的主动土压力.

(2) 出土量. 出土量的控制直接反应在了土舱压力上. 在盾构施工过程中, 应遵守出土量与盾构掘进速度相匹配的原则. 为保证施工过程中的出土量控制, 需对出土量进行严格的记录、监督, 并随时分析排

渣土质,同时及时根据地质条件的变化调整出土量。

(3)同步注浆与二次注浆.为减少和防止地面沉降,在盾构掘进过程中,应尽快在脱出盾构的管片背后空隙中充填足量的浆液材料,进行同步注浆。

盾构施工后期的地面沉降速率虽然较慢,但其累计值却占到总沉降量的 50%左右.对地面有建筑物的情况,利用跟踪注浆(二次注浆)的方法来控制后期沉降,是一种效果良好且必须的手段。

3.2 参数计算

(1)土舱压力.选取北客站~北苑站区间段为例,计算土舱压力的设定值.根据地质勘查报告,北~北区间物理力学综合设计参数值见表 1。

表 1 北~北区间主要物理力学参数值表

Tab. 1 The main physical and mechanical parameters diagram in the section of North~North

岩土层名称	含水量 $w/\%$	干密度 $\rho_d/g \cdot cm^{-3}$	孔隙比 e	饱和度 $S_r/\%$	孔隙率 $n/\%$	土粒比重 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/^\circ$
杂填土	—	1.75	—	60	—	—	—	—	5	10
素填土	20.5	1.59	0.765	80	40	2.71	29.3	17.9	20	15
黄土状土	20.5	1.65	0.660	87	40	2.72	29.0	17.7	35	22
粉质粘土	24.9	1.61	0.700	96	41	2.72	31.5	18.9	32	17
粉细砂	18.6	1.63	0.660	77	39	2.70	—	—	0	30
中砂	16.0	1.59	0.648	75	40	2.68	—	—	0	32
粗砂	17.0	1.64	0.622	83	38	2.67	—	—	0	34

选取北~北区间具有代表性的某一断面计算土舱压力的合理设定值.如图 4 所示,断面地层从上至下依次为黄土状土,粉质粘土,粉细砂和中砂.隧道断面穿越的地层由粉细砂和中砂组成,其厚度分别为 3.30 m 和 2.70 m.盾构轴线位于地下 12.20 m.土舱压力近似等于刀盘前方水土压力之和.把盾构刀盘看作挡土墙,由于“墙背”竖直,故采用郎肯土压力公式进行计算.由于此断面地面空旷,没有建筑物,可以采用欠压快速掘进,跟紧注浆的方式,因此,计算刀盘前方的主动土压力。

在表面水平的半空间弹性体中,于深度 z 处取一微小单元体^[11].若土的天然重度为 γ ,则作用在此微元体顶面的法向应力 σ_1 ,即为该出土的自重应力,即:

$$\sigma_1 = \sigma_z = \gamma z \quad (1)$$

同时,作用在此微元体侧面的应力为:

$$\sigma_3 = \sigma_x = K_0 \gamma z \quad (2)$$

引入粘性土的极限平衡公式:

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) - 2c \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (3)$$

可得粘性土的主动土压力计算公式:

$$p_a = \gamma z K_a - 2c \sqrt{K_a} \quad (4)$$

对于无粘性土,即当 $c=0$ 时,主动土压力计算公式为:

$$p_a = \gamma z K_a \quad (5)$$

式中: p_a 为主动土压力,即 σ_3 , kPa; K_a 为主动土压力系数, $K_a = \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$; c 为粘性土的粘聚力, kPa; φ 为土的内摩擦角; γ 为墙后填土的重度, kN/m³; z 为计算点离填土表面的深度, m。

粉细砂和中砂的内摩擦角分别为 φ_1 和 φ_2 . 根据表 1 的各参数计算出粉细砂、中砂的天然重度和有

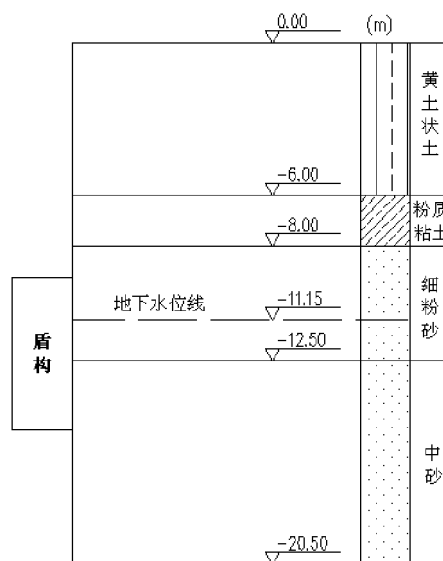


图 4 盾构穿越地层示意图

Fig. 4 The scheme of the EPB shield machine driving across the stratum

效重度及各自的主动土压力系数,计算结果如表2所示。

分别计算第一层和第二层土的土压力,计算简图如图5、图6所示。经计算,总主动土压力为:

$$p_a = p_1 + p_2 = 141.24 \text{ kPa}$$

p_1 、 p_2 分别为第一层和第二层土的土压力。

郎肯土压力理论有其特殊的适用条件,即:①挡土墙的墙背竖直、光滑;②挡土墙后填土表面水平。

表2 主要计算参数表

Tab. 2 The main calculation parameters diagram

地层特征	天然重度 $\Gamma/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	有效重度 $\Gamma'/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	主动土压 力系数 K_a	土层厚度 H/m
粉细砂	19.33	10.24	0.333	3.30
中砂	18.44	9.94	0.307	2.70

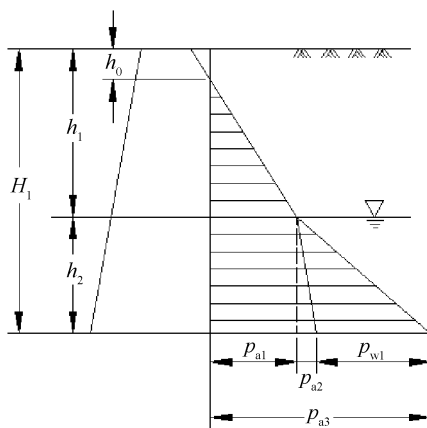


图5 第一层土压力计算图

Fig. 5 Calculation graph of earth pressure of the first layer

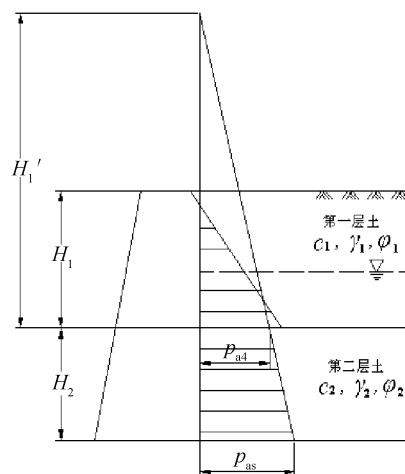


图6 第二层土压力计算图

Fig. 6 Calculation graph of earth pressure of the second layer

由于计算盾构土舱压力时,刀盘并非光滑,而是与土体之间存在墙土摩擦角 δ ,所以最终的土压力值应小于 p_a ,可取为140 kPa。

(2)出土量。西安地铁二号线工程所使用的土压平衡盾构机的外径是6.14 m,预制管片的外径为6 m,掘进一环的长度为1.5 m,所以盾构掘进一环的挖土量的体积为:

$$Q_d = \frac{\pi D^2}{4} L \quad (6)$$

式中: Q_d 为盾构掘进一环的挖土量, m^3 ; D 为盾构外径, m ; L 为每环的长度, m 。

经计算,可得盾构掘进一环的挖土量为44.4 m^3 。

从理论上讲,要保持盾构开挖面的平衡,应使得挖土量和盾构的出土量相等。但在砂层中由于需要进行渣土改良,实际的出土量还应包括添加的膨润土或泡沫剂的体积,根据渣土改良试验得知,改良剂与出土量的最优体积比为2:10,故:

$$Q = 1.2 K_1 Q_d = 57.5 \text{ m}^3$$

式中: Q 为盾构掘进一环实际出土量, m^3 ; K_1 为土的最初松散系数,取1.08。

结合西安地铁2号线北~北区间站现场情况,为防止超挖造成地表塌陷,出土量应控制在54~58 m^3 。

(3)注浆量。同步注浆的注浆量经验计算公式为:

$$Q_l = \lambda \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} L \quad (7)$$

式中: Q_l 为盾构掘进一环的注浆量, m^3 ; λ 为注浆率,与工法、土质、浆液及注入压力等因素有关,一般取130%~180%; d 为预制管片的外径, m 。

其余符号同前。

经计算, Q_l 的取值应在2.6~3.6 m^3 ,在曲线段施工时,注浆量要随空隙的增大而增大并且压浆速

度应与推进速度相匹配。

(4)注浆压力. 注浆压力是指浆液填充管片背面空隙所需要的注入压力. 正确数值应该是盾尾出浆口的压力, 此压力与地层种类、地下水压、浆液性能等有关. 注浆压力可以通过计算来预测, 最好的办法是通过试验掘进段来确定. 注浆压力应与注浆量和盾构机掘进的速度相匹配. 根据现场施工经验, 注浆压力控制在 1.1~1.2 倍静止土压力比较合适。

根据公式(1)、(2), 静止土压力系数 K_0 取 0.4, 可计算出该断面的静止土压力约为 180 kPa, 则注浆压力取值范围应在 200~220 kPa。

在地质条件为中、粗砂及砾砂的情况下, 各项施工控制措施参数的计算结果如表 3 所示。

表 3 不同地层施工参数建议值表

Tab. 3 Construction parameters recommendations in different strata

地层特征	施工方法	土舱压力 /kPa	出土量 /m ³	注浆压力 /kPa	注浆量 /m ³	改良方案
粉细砂、中砂	欠压快速模式	140	54	210	4	选择质量比为 1:10 的膨润土泥浆, 泥浆体积掺入比为 2:10
中、粗砂	土压平衡模式	240	56	270	4	选择质量比为 1:10 的膨润土泥浆, 泥浆体积掺入比为 2:10
砾砂	膨润土和黄 土泥浆改良	260	55	300	4	选择质量比为 1:10 的膨润土泥浆, 泥浆体积掺入比为 2:10, 同时加入膨润土质量 1.5 倍的黄土

4 结 论

(1)使用质量比为 1:10 的膨润土泥浆, 在与渣土体积比为 2:10 的情况下对中细砂、中粗砂进行改良以及经过 1:10 的膨润土泥浆加入与膨润土质量比为 2:3 的黄土组成混合泥浆对砾砂进行改良后, 土压平衡盾构可以适用于砂质土层。

(2)土压平衡盾构穿越砂层时, 纵向地表沉降大致分布在刀盘前方 15~20 m 至盾尾后方 35~40 m 的范围内, 横向上的地表沉降分布在以线路中心线为对称轴的 8 倍洞径左右, 主要影响区在距隧道轴线一侧约 1 倍洞径范围。

(3)在盾构施工过程中, 地表沉降的主要影响因素有土舱压力、出土量、同步注浆与二次注浆等. 通过对各项措施改进, 地表沉降的控制效果比较明显. 在施工过程中, 土舱压力、出土量、注浆量与注浆压力的设定应相互协调, 各参数的取值应与具体施工条件和施工环境相适应. 实际施工中可参考表 3 进行取舍。

参考文献 References

- [1] 李曙光, 方理刚. 土压平衡盾构法隧道施工中影响地表沉降的因素浅析[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(5): 72-76.
LI Shu-guang, FANG Li-gang. Analysis on the factors affecting ground settlements caused by EPB TBM tunneling [J]. Modern Tunnelling Technology, 2007, 44(5): 72-76.
- [2] 唐益群, 宋永辉, 周念清, 等. 土压平衡盾构在砂性土中施工问题的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 52-56.
TANG Yi-qun, SONG Yong-hui, ZHOU Nian-qing, et al. Experimental research on troubles of EPB shield construction in sandy soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 52-56.
- [3] 谭忠盛, 洪开荣. 软硬不均地层复合盾构的研究及掘进技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(S2): 3945-3952.
TAN Zhong-sheng, HONG Kai-rong. Study on composite shield and construction technique in complex uneven strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 3945-3952.
- [4] 刘建航, 侯学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.
LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan. Shield Tunneling[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1991.

- [5] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering Mexico City, 1969:225-290.
- [6] 韩日美, 宋战平, 吴焕通. 盾尾间隙注浆对地表沉降的影响研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2010, 42(3):353-357.
HAN Ri-mei, SONG Zhan-ping, WU Huan-tong. Numerical analysis on ground surface subsidence affected by back grouting of shield tunnelling[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(3):353-357.
- [7] 阳军生, 刘宝琛. 城市隧道施工引起的地表移动及变形[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.
YANG Jun-sheng, LIU Bao-chen. The ground movement and deformation caused by tunnelling construction in City [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2002.
- [8] 朱忠隆, 张庆贫. 盾构法施工对土体影响理论与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(增刊):1087-1090.
ZHU Zhong-long, ZHANG Qing-pin. Theoretical and experimental study on the influence of soil through Shield construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(Suppliment):1087-1090.
- [9] 杨永强. 土压平衡盾构全断面砂层施工关键技术[J]. 施工技术, 2012, 41(1): 69-74.
YANG Yong-qiang. Key Construction Techniques of Earth Pressure Balance Shield in the Whole Section Sand Layer[J]. Construction Technology, 2012, 41(1): 69-74.
- [10] 高颂东. 土工分析中水土分算、水土合算的概念、原理与应用实例[J]. 建筑科学, 2004, 20(4): 33-42.
GAO Song-dong. Conceptions, Principle and Application Examples of The Separate Calculation and Combining Calculation of Water and Soil Pressure in Soil Engineering Analysis[J]. Building Science, 2004, 20(4): 33-42.
- [11] 陈希哲. 土力学地基基础[M]. 3版. 北京:清华大学出版社, 1997.
CHEN Xi-zhe. Soil Mechanics and Ground Foundation(3rd Edition)[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.

The earth surface deformation and control technology as EPB shield machine driving through layer with sand

HU Chang-ming, ZHANG Wen-cui, MEI Yuan, GONG Shao-rui, CUI Yao

(School of Civil Engineering School of, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Certain interval engineering by the EPB shield machine in Xi'an Metro Line 2 is taken as example. Based on the statistical results of the monitoring data, and combined with the sediment improvement test, make a research is carried out about the main factors and control technology of the surface deformation with the EPB shield machine driven across the sand of loess and the full section soil. Meanwhile, according to the analysis of the field test results, the empirical value of the main influencing factors such as soil warehouses pressure, volume of excavated earth, grouting pressure and grouting quantity etc are given. The result showed that when the EPB shield went through the sand layer, it showed a strong inadaptability. But after the sediment improvement test by the bentonite clay, the driving speed of the shield improved quickly and the construction progress became relatively fast. When the value of soil warehouses pressure, volume of excavated earth, grouting pressure and grouting quantity are respectively controlled at 140~260 kPa, 54~56 m³, 210~300 kPa and 4 m³, the EPB shield machine showed a satisfactory performance. The conclusions serves as a reference for the problems of inadaptability as the EPB shield machine was driven across the stratum in similar projects.

Key words: EPB shield machine; full section sandy soil; inadaptability; sediment improvement; deformation control