

doi:10.3969/j.issn.1674-4764.2013.01.003

砂卵石地层盾构施工引发的滞后地面塌陷机理

白永学, 漆泰岳, 吴占瑞

(西南交通大学土木工程学院, 成都 610031)

摘要:针对砂卵石地层盾构施工地面突发塌陷频发的情况,结合成都地铁 1、2 号线地面塌陷实例,研究了盾构施工引发的滞后地面塌陷机理;分析了砂卵石地层地质条件,利用大型三轴剪切试验获得其力学特性;选用颗粒离散元法进行数值计算,通过三轴数值试验标定了土体的细观参数;通过数值计算模拟了开挖面失稳和空洞向地表移动。研究表明,当开挖面支护压力较小时,位移大于 0.1 m 的颗粒接触力极低,该区域的土体孔隙率变大、力学性质也降低,该区域是开挖面失稳区,掘进过后将在盾构上方形成空洞;砂卵石层开挖面上方土体成拱作用明显,即使土层内部形成空洞,也不会立刻引起地面塌陷,这是地面滞后塌陷的重要原因。

关键词:砂卵石地层;地面塌陷;颗粒离散元;隧道

中图分类号:TU47 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)01-0012-08

Lagged Surface Collapse Mechanism of Shield Construction in Sandy Pebble Stratum

Bai Yongxue, Qi Taiyue, Wu Zhanrui

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: As for many lagged surface collapse cases that shield crosses the sandy cobble stratum in Chengdu metro No. 1 and 2 lines, lagged surface collapse mechanism in sandy pebble stratum was studied. Conditions of engineering geology about sandy cobble stratum were analyzed. Mechanical behavior of sandy pebble was obtained via large-scale tri-axial test. Discrete element method was adopted for numerical computation on lagged surface collapse mechanism. According to the tri-axial numerical test method, the relation between the micro parameters and macro parameters of the sandy pebble stratum layer in Chengdu was calibrated. The face failure of shield tunneling and upward movement of cavity was simulated by numerical calculation. When supporting pressure is small, the particles with the displacement of over 0.1 m have low contact force. The porosity of earth in the region becomes larger and its mechanical behavior becomes worse. Therefore the region can be identified as instability region. Cavity in the ground will be caused after shield tunneling. Soil arching effect is obvious under shield construction. Even though there is cavity in the ground, surface collapse will not bring about immediately. This is important reason for lagged surface collapse phenomena of shield construction in sandy pebble stratum.

Key words: sandy pebble stratum; lagged surface collapses; particle discrete element; tunnels

收稿日期:2011-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50879049)

作者简介:白永学(1978-),男,博士,主要从事隧道及地下工程研究,(E-mail)baiyx78@163.com。

随着经济快速发展,为了缓解交通拥挤问题,许多大城市开始筹划和修建地铁工程。在此期间,盾构施工产生了很多地面塌陷事故^[1-3]。地铁线路多位于城市道路和居民区地下,地面塌陷事故发生突然、危害性大,因此引起了社会的广泛关注。

李希元^[4]通过调查分析上海、广州、北京等地 25 起盾构隧道施工事故发生,地面塌陷占事故总量的 60%。地面塌陷是指岩土体在自然或人为因素作用下,向下陷落,并在地表形成塌陷坑的一种地质现象^[5]。目前,对岩溶塌陷和采空区地面塌陷的研究文献较多^[6-8],研究的内容也比较深入,而针对盾构施工引起的地面塌陷研究较少,文献^[9-11]对部分盾构施工引起的地面塌陷原因和形成过程进行了分析,而对盾构施工引起地面塌陷机理的研究则更少。

各大城市隧道施工引起地面塌陷事故频繁发生,主要原因在于没有从本质上认识城市隧道施工过程中地面塌陷事故的诱发因素、形成机制和演化规律^[12],这已成为盾构施工所面临的重要技术难题。砂卵石地层中盾构掘进的经验和理论尚不成熟,笔者主要研究砂卵石层地面塌陷的演变机理。

1 成都砂卵石地层盾构施工概况

1.1 地质条件

成都平原地处川西平原岷江水系东南面,为侵蚀-堆积阶地地貌,地势平坦。地表多人工填筑(Q_4^{ml})杂填土,厚度 1~3 m;其下主要为砂卵石土,卵石土大部分为全新统冲积层(Q_4^{al})和上更新统冲积层(Q_3^{al+pl});基岩为泥岩,埋深较深。砂卵石层主要地质特征为:

1)卵石含量高,含量在 50%~85%之间,粒径以 20~100 mm 为主,充填物主要为细砂和中砂。

2)卵石粒径大,个别粒径达到 1 m 以上;卵石层中分布漂石,主要位于在 Q_3 地层中,含量大致为 10%~15%。

3)卵石抗压强度高,普遍在 55~165 MPa 之间。

4)卵石层中含砂量高(大致为 20%~40%),而含泥量较少,属于无黏性颗粒土。

5)卵石层中随机分布透镜状砂层和粉土,力学性质低,厚度可达 2~3 m。

地下水主要为卵石层中的孔隙潜水,含水丰富,渗透系数为 15~40 m/d,为强透土层。在天然状态下,枯水期地下水位埋深 3.0~6.0 m,洪水期地下水位埋深 2.5~4.0 m,地下水位年变化幅度为 1.0~3.0 m。

1.2 盾构施工方法

根据成都砂卵石层的地质情况,地铁 1、2 号线

采用加泥式土压平衡盾构施工^[13]。砂卵石地层颗粒粒径大,颗粒之间的摩擦系数高,刀盘切削下来的土体流动性差,密封舱内的碴土很难通过螺旋输送机排出;另外,切削下来的土体松散,渗透系数高,止水效果差,地下水渗透力对开挖面的稳定性不利;因此,必须对土舱内的土体进行渣土改良。添加材料一般采用由粘土、膨润土及发泡剂等材料制成的泥浆液,泥浆液能有效增加舱内土体的流动性和止水性;另外,高密度膨润土有较好的粘结性,并能渗入砾质碴土的孔隙中,从而实现止水和固结掌子面的作用,对强透水性的砂卵石土中使用膨润土的意义重大。

为了实现碴土的改良,加泥式土压平衡盾构机配有 2 套碴土改良系统:泡沫注入系统和膨润土注入系统。通过双活塞泵将泥浆和泡沫压入刀盘前端和土舱内,注入系统管路示意图如图 1 所示。

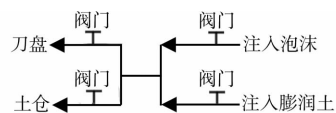


图 1 膨润土管路示意图

改良渣土充满密封舱后,在盾构顶推力的作用下,可使切削土对开挖面形成被动土压力,从而与开挖面上的水土压力相平衡,以保持开挖面的稳定。另外,为了进一步保证开挖面的稳定性,减小地下水对开挖面的影响,气压辅助工法成为施工中必备辅助措施。

1.3 地面塌陷现状

成都修建地铁 1 号线时,仅人民路上就发生过数十次地面塌陷,严重影响城市居民的生产和生活,造成一定的不良社会影响。

砂卵石地层地面塌陷的特点主要为滞后性和突发性。通常地层内的空洞几个月甚至几年后才波及到地面,表现为一定的滞后性;其次,当空洞波及到地面时,在外界荷载作用下,土体自稳能力急剧降低,往往地面塌陷事先没有征兆,表现为突发性。另外,地面塌陷的塌坑体积较大,塌坑深度有时会超过塌坑宽度,因此危害性较大。

对成都地铁 1 号线地面塌陷的实例调查发现,绝大部分塌陷位于盾构正上方,塌坑的形状为坛子状,上口小,下面大;主要因为路面有一定的承载能力,且地表土具有弱粘聚力;这和采矿塌陷形成的塌陷漏斗形状相似^[5]。

2 砂卵石地层突发地面塌陷的形成机理

砂卵石地层盾构施工引发的突发地面塌陷主要

包括 3 个方面:盾构开挖面失稳、开挖面失稳超出土形成空洞和空洞向地表移动。

2.1 开挖面失稳

盾构掘进开挖面失稳主要由于支护压力不足引起,合理的开挖面支护压力主要取决于地质情况、盾构埋深、盾构直径、地下水位等^[14]。当开挖面的支护压力小于极限支护压力时,开挖面前方土体将形成一定范围的滑动区域,开挖面也随之产生失稳。开挖面失稳主要包括整体失稳和局部失稳 2 种情况,当盾构前方土体松散且埋深较浅时,开挖面表现出整体失稳,如图 2(a);当盾构埋深较深且土层相对稳定时,开挖面表现出局部失稳,如图 2(b)。

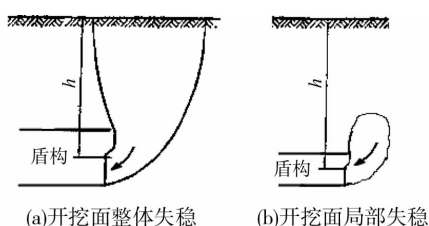


图 2 盾构开挖面失稳模式

2.2 开挖面失稳后形成空洞

在砂卵石地层中,盾构满舱掘进容易使压力舱土体闭塞、渣土流动性降低和排土困难,通常在实际施工中盾构机土舱总是非满舱掘进,因而总体上表现出“欠压状态”,这能通过土舱内压力传感器的变化情况得到验证。施工中,中下部压力传感器的数值随时发生变化,主要原因是土舱内的土体随刀盘转动而运动,由于颗粒的挤压作用不断变化,所以其压力传感器数值随时变化。而上部的压力传感器数值基本稳定不变,压力值反映的为气压值,因而该压力传感器处无渣土,这就验证了盾构施工为非满舱掘进。

在盾构掘进过程中,经过改良的渣土具有减小摩擦、降低扭矩、抗渗和保压的作用。但由于重力作用,注入刀盘的泥浆和泡沫沿重力作用向下流淌,且盾构施工为非满舱掘进,泥浆对开挖面上部土体的抗渗透作用和润滑作用很小。因而,盾构施工对开挖面上部扰动大,气体压力对保证开挖面上部的稳定作用也有所减小。

上述分析表明,盾构施工基本是非满舱状态掘进,这也是导致开挖面超出土的重要原因。砂卵石地层受压时强度高、变形小;而粘聚力低,不能承受拉应力和拉应变。当土舱上部无土时,开挖面前上方的土体颗粒由于重力作用产生向下运动,承受向下的拉应力和拉应变;因此,当非满舱掘进时,开挖

面上部的土体容易坍塌脱落,进而涌入土舱。这是开挖面上方容易形成空洞的主要力学原因。

因此,开挖面上部土体的稳定性控制是施工中的薄弱环节,开挖面土体失稳后,容易在开挖面上部形成空洞。这 and 实际调查情况相符合。

当盾构因超出土而形成土层内部空洞后,主要有以下原因可导致地层内部空洞不能被注浆回填:注浆量不足;浆液向地层渗透和流失;空洞形成后离同步注浆有较长的时间间隔,通常至少在 15 h 后,在此时间段空洞已向上坍塌移动至上部地层处。

2.3 空洞上移引发突发地面塌陷

通过上述分析可以看出,盾构施工产生的空洞主要集中在开挖面上部。由于砂卵石具有一定的成拱作用,因而在盾构上部形成相对稳定的空洞。由于地下水位变化、地面荷载影响和土体强度逐渐减弱等作用,空洞顶部土体不断脱落下坠,空洞逐渐向上移动并发展到地表,最终造成盾构掘进后的滞后突发地面塌陷。

3 盾构掘进滞后塌陷机理的数值计算

成都砂卵石土具有粘聚力低、离散性强的特点,盾构施工开挖面土体容易产生坍塌和滑落。据此,选用能够模拟土体颗粒平动、转动、分离和大变形等力学现象的颗粒离散元法进行数值计算^[15-16]。

砂卵石土根据密实程度分为松散砂卵石层、稍密砂卵石层、中密砂卵石层和密实砂卵石层 4 个亚组,由于盾构埋深普遍在 8~20 m 之间,因此盾构普遍穿越的地层为稍密卵石与密实卵石层之间,其中稍密砂卵石的稳定性较差,是盾构施工产生地面塌陷的主要影响土层,因此选择稍密砂卵石土为研究对象。在实际工程中地层表面会有厚度较小的素填土和杂填土,其对地面塌陷影响很小,因而在数值计算中忽略其作用。

地下水是影响地下工程的重要因素,有时甚至是决定性的。目前,在砂卵石地层中盾构选型主要采用加泥式土压平衡盾构机,该类盾构在施工过程中需要向土舱内加入膨润土和泡沫对渣土进行改良,从而提高渣土的止水性和抗渗性,注入土舱内的改良材料具有较好的粘结性,能渗入土体孔隙中,从而进一步实现对掌子面止水和固结作用。此外,盾构施工中普遍采用气压辅助工法,当气压大于开挖面水压时,开挖面并无渗水现象,还能将开挖面土体内的水排干,因而此种工况下地下水基本处于静止状态,可不考虑水的渗透影响。当盾构掘进形成土层内部空洞后,空洞会逐渐向地面发展,空洞顶部的

土体的分离、坍塌及滑落过程中,地下水是处于静止状态的。因此,数值计算中按照总应力法计算,而忽略地下水渗流的影响。

3.1 大型三轴试验及颗粒流细观参数标定

数值计算中主要考虑稳定性较差的稍密卵石土,应用大型三轴试验得到偏应力-轴向应变曲线,并使用颗粒离散元法进行三轴数值模拟试验,从而对稍密卵石土进行细观参数的标定,数值试验和室内试验的偏应力-轴向应变曲线对比见图 3。

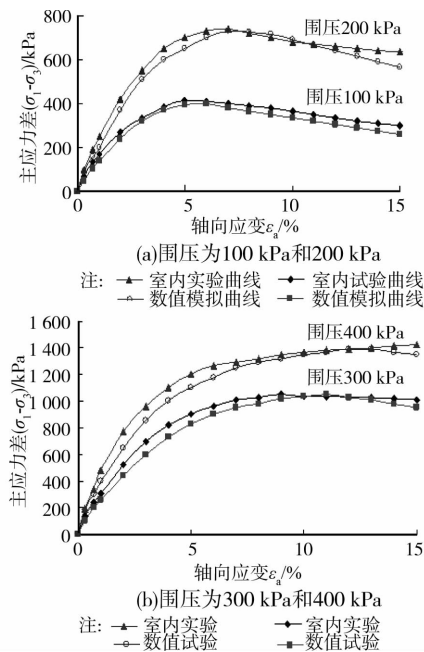


图 3 数值试验与室内试验应力-应变曲线比较

通过大型三轴试验,稍密卵石土的宏观力学参数见表 1。经过反复调整,综合考虑内摩擦角、变形模量、泊松比等因素影响,得到一组较为理想的稍密卵石土细观参数(见表 2)。

表 1 稍密卵石的宏观力学参数

土体密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	变形模量/ MPa	泊松比
2 180	37.5	28	0.31

表 2 离散元的细观力学参数

法向接触 刚度 k_n / ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向接触 刚度 k_s / ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	摩擦 系数 μ	孔隙率 n	颗粒 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$R_{\max}/$ R_{\min}
1.6×10^7	8×10^6	1.3	0.35	3354	1.33

注:宏观土体密度和颗粒离散元中的颗粒密度的关系为: $\rho = \rho_0 \cdot (1 - n)$ 。式中: ρ 为宏观土体密度,见表 1; ρ_0 为颗粒离散元中的颗粒密度; n 为颗粒离散元中的孔隙率。

3.2 开挖面失稳产生空洞机理的模拟

利用土压平衡盾构施工,开挖面支护压力控制

是保证掘进顺利进行的关键,开挖面失稳主要是由于盾构机开挖面支护压力小于极限支护压力所引起^[17],开挖面支护压力小于极限支护压力也是产生土层内部空洞的主要原因。

3.2.1 数值计算模型 在数值计算中,模型尺寸为 $30 \text{ m} \times 22 \text{ m} \times 15 \text{ m}$,管片直径为 6 m ,开挖直径为 6.28 m ,埋深为 10 m ,采用 81012 个颗粒进行模拟,模型如图 4 所示。地面为自由面,模型四周采用位移约束条件,管片采用 wall 单元模拟。

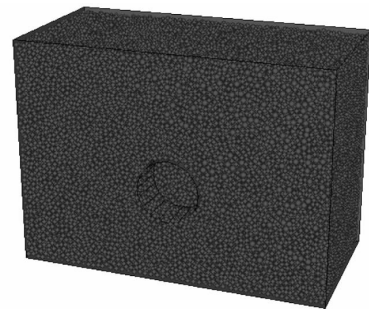


图 4 数值计算模型图

假设开挖面支护压力为梯形荷载,取其中中心点的支护压力为代表值,并引入支护压力比 λ 和静止土压力进行比较^[18]:

$$\lambda = \frac{\sigma_s}{\sigma_0} \quad (1)$$

式中: σ_s 为开挖面中心处的支护压力, σ_0 为其对应的水平静止土压力。

3.2.2 数值计算结果分析

1) 开挖面失稳的确定 盾构施工引起开挖面附近土体应力释放,从而导致周围土体发生位移,支护压力比与开挖面土体最大水平位移关系如图 5 所示。

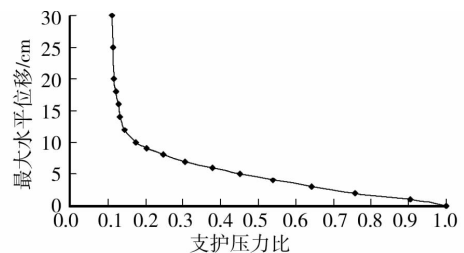


图 5 支护压力比和最大水平位移的关系

从图 5 中可以看出,初始阶段,支护压力比和开挖面最大水平位移成线性变化,这个阶段开挖面颗粒位移变化较小,而开挖面支护压力变化较大。

当 $\lambda = 0.2 \sim 0.12$ 时,开挖面支护压力的变化幅度很小,而开挖面周围土体位移变化幅度很大,表现为开挖面周围土体的位移对支护压力变化较敏感。

当 $\lambda < 0.12$ 时,在支护压力不变的情况下,开挖

面的土体位移不断加大。在这个阶段,开挖面土体发生失稳滑动,开挖面颗粒进入崩塌滑落状态。

2) 支护压力对开挖面变形的影响 不同支护压力比对应的开挖面横向剖面变形见图 6;从图中可以看出,随着支护压力比减小,开挖面扰动土体范围不断加大,在重力方向扰动土体范围扩大趋势尤其显著。当开挖面失稳后,开挖面失稳表现为舱筒形状,数值模拟结果与 Chambon 等^[19]、Kamata 等^[20]和 Kirsch^[21]对于砂进行的离心模型试验结果相符。

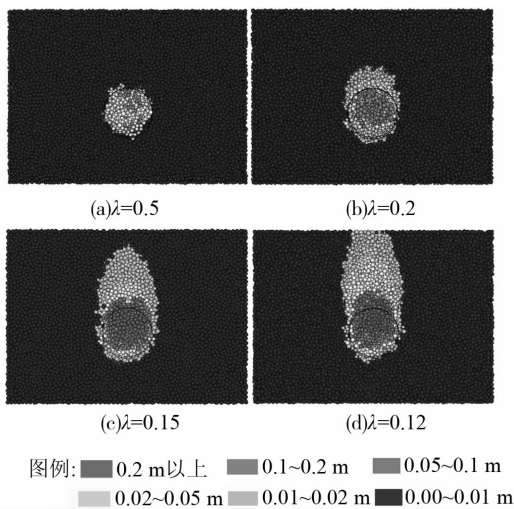


图 6 不同支护压力比的开挖面横向剖面变形图

3) 开挖面失稳区域分析 为了更好地观察颗粒位移和土颗粒接触力的关系,对 2 种图形进行叠加,图 7 为位移-接触力叠加纵向剖面图。从该图中可以看出,当 $\lambda=0.5\sim 0.2$ 时,开挖面的接触力变化不大;当 $\lambda=0.2\sim 0.15$ 时,开挖面前方扰动区域加大趋势明显,并向上方逐渐延伸;当 $\lambda=0.12$ 时,此时开挖面已经失稳,位移大于 0.1 m 的区域,颗粒间的接触力极低,该区域的土体孔隙率上升、密度下降、力学性质也大大降低,因而可以判定该区域是开挖面失稳区。

开挖面失稳后土方超挖、形成空洞已经不可避免,超挖的范围为盾构上方 2~3 m 范围,在这种情况下如不及时增加支护压力,盾构掘进过后将在盾构上方出现较大空洞。

4) 土拱作用分析 从图 7 中可以看出,位移为 0.05~0.1 m 之间的土体接触力较小,是接触力变化区域。开挖面上方位移小于 0.05 m 范围内的土体,由于重力作用向下移动,颗粒之间相互挤压和摩擦,形成有一定承载能力的土拱。在土拱支护作用下,即使开挖面失稳形成土层内部空洞,也不会立刻引起地面塌陷,这是引发滞后地面塌陷的重要原因。

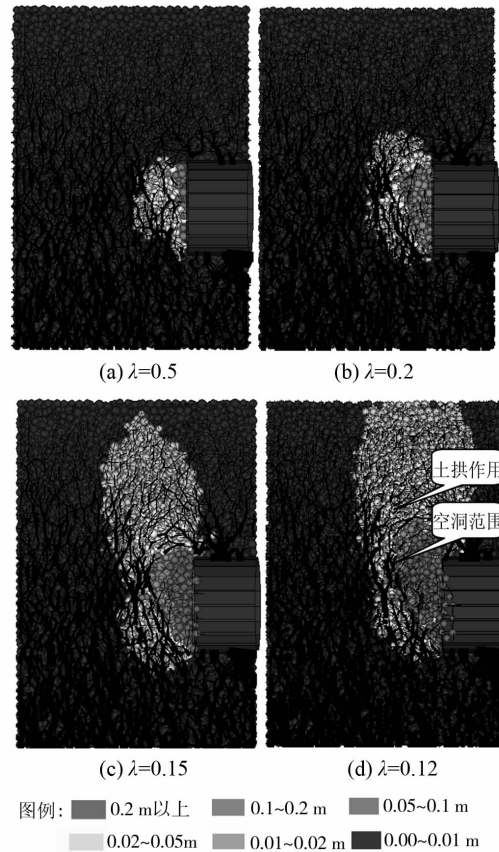


图 7 位移-接触力线叠加图

3.3 空洞上移引起地面塌陷的数值模拟

当盾构开挖面失稳形成土层内部空洞后,空洞周围土体不断脱落下坠,空洞逐渐向上移动并发展到地表,从而造成盾构掘进后的滞后突发地面塌陷,笔者利用颗粒离散元法模拟空洞坍塌变形和发展过程。

颗粒离散元法以单个颗粒为基本单元,对每个颗粒建立运动方程,应用力-位移定律和牛顿第二定律,利用差分法求解一个微小时段的速度和位移,并对时域进行积分,由此计算出颗粒间分离和大变形等问题^[22-23]。在计算中,虽然计算步不是真实时间,但可以表明力-位移的变化规律,因此,可以通过不同计算步来观察滞后塌陷的整个过程。

3.3.1 数值计算模型 模型尺寸为 30 m×22 m×3 m,管片直径为 6 m,开挖直径为 6.28 m,埋深为 10 m,按照超挖 25m³/环的情况模拟空洞,每环长度为 1.5 m,根据成都砂卵石地层盾构掘进经验,空洞主要集中在盾构顶部,并呈中间高度大并向两端逐渐减小的趋势分布,模型采用 34 016 个颗粒进行数值分析,颗粒的细观参数见表 2。

3.3.2 滞后塌陷地层变形分析 盾构上方空洞附近土体位移变化情况和坍塌破坏过程见图 8。

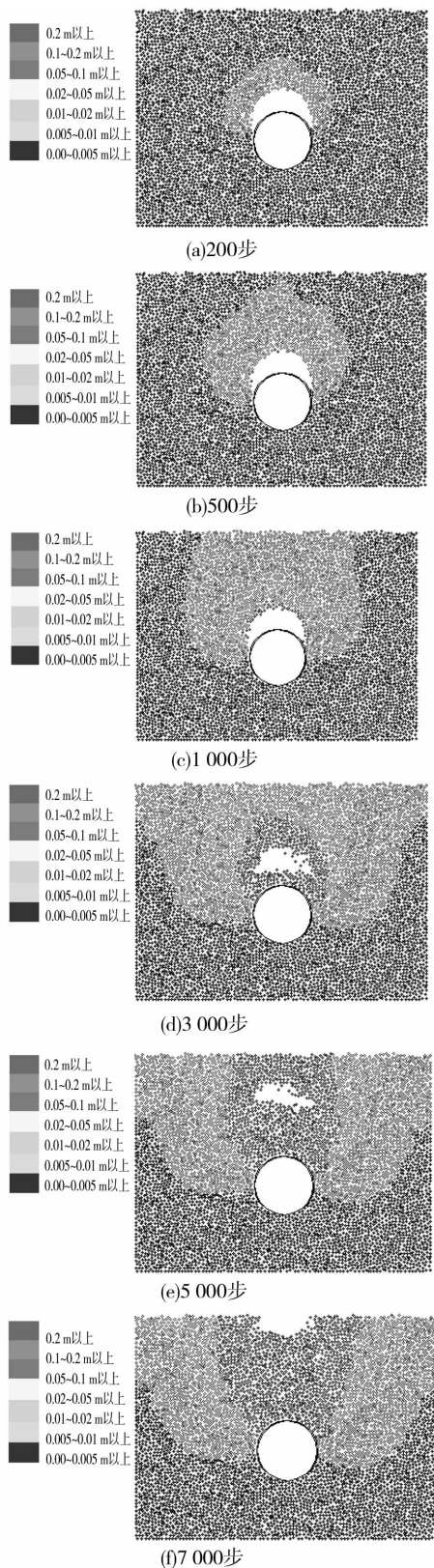


图 8 空洞坍塌破坏过程

在空洞形成初期,空洞上方的土体缓慢向洞内移动,与临空洞面距离越远,土体位移逐渐递减。由于自重作用,洞内临空面的颗粒位移不断加大,当颗粒之间的重力大于相互间的摩擦力,颗粒逐渐向空

洞内掉落。向洞内掉落的颗粒堆积在空洞的底部,经过应力调整重新达到平衡状态;掉落的颗粒能够给空洞的侧面颗粒提供一定的侧向压力,从而使空洞侧面的颗粒也达到平衡状态。与此往复,空洞就像一个移动的不规则的水泡由地层深处逐渐移动至地层表面,最终引起地面塌陷。

原状地层比较密实,而掉落底部堆积后的土体比较松散,因此随着空洞向地表移动,空洞体积有所减小。数值计算的这种现象和矿山开采的冒落岩块碎胀充填论^[5]的结论是一致的。冒落岩块碎胀充填论认为开采空间引起覆岩冒落,冒落岩体破碎后孔隙度加大,膨胀起来充填采空区,从而限制了冒落的发展,使之趋于稳定。这也是超出土量比较少,空洞只能扰动地层而不能发展到地面的原因。

3.3.3 滞后塌陷土体接触力演变分析 空洞向地面移动的过程,地层的应力状态也发生了较大变化。颗粒离散元主要用法向接触力和切向接触力描述地层内颗粒的受力状况,法向接触力是由于颗粒之间的相互挤压而引起,切向接触力是由于颗粒之间的相互摩擦而产生。因此主要从法向接触力线图和切向接触力线图来阐述土体应力变化过程。

1)切向接触力的演变 图 9 是空洞上移过程的切向接触力线图,通过该图可以清楚的看出,随着土体向洞内塌落,洞内临空面上方形形成一定的松散带;而空洞外侧一定范围的土体向洞内挤入,加大了颗粒之间的相互运动的趋势,因而切向接触力明显加大,并呈现拱状,表现出一定的土拱效应。

随着空洞内上方的土体不断掉入空洞底部,空洞不断上移;当空洞上移一定的距离以后,土拱效应逐渐消失,从而引起地面突发塌陷。

2)法向接触力的演变 图 10 是空洞上移过程的法向接触力线图。土拱是用来描述应力转移的一种现象,这种应力转移是通过土体抗剪强度的发挥而实现的^[24]。通过对比切向接触力线图和法向接触力线图可以看出,空洞周围土体的切向力增大趋势明显,土体颗粒之间通过相互摩擦提高了承载力,从而起到了土拱的作用;而法向力变化相对较小。然而,颗粒之间的法向接触力在土拱圈附近呈明显方向性,法向接触力和拱圈的切线方向基本一致,这也是土拱作用的体现。

4 结 语

1)砂卵石地层盾构施工滞后地面塌陷的机理主要包括:盾构开挖面失稳、开挖面失稳超出土形成空洞和空洞向地表移动 3 个方面。

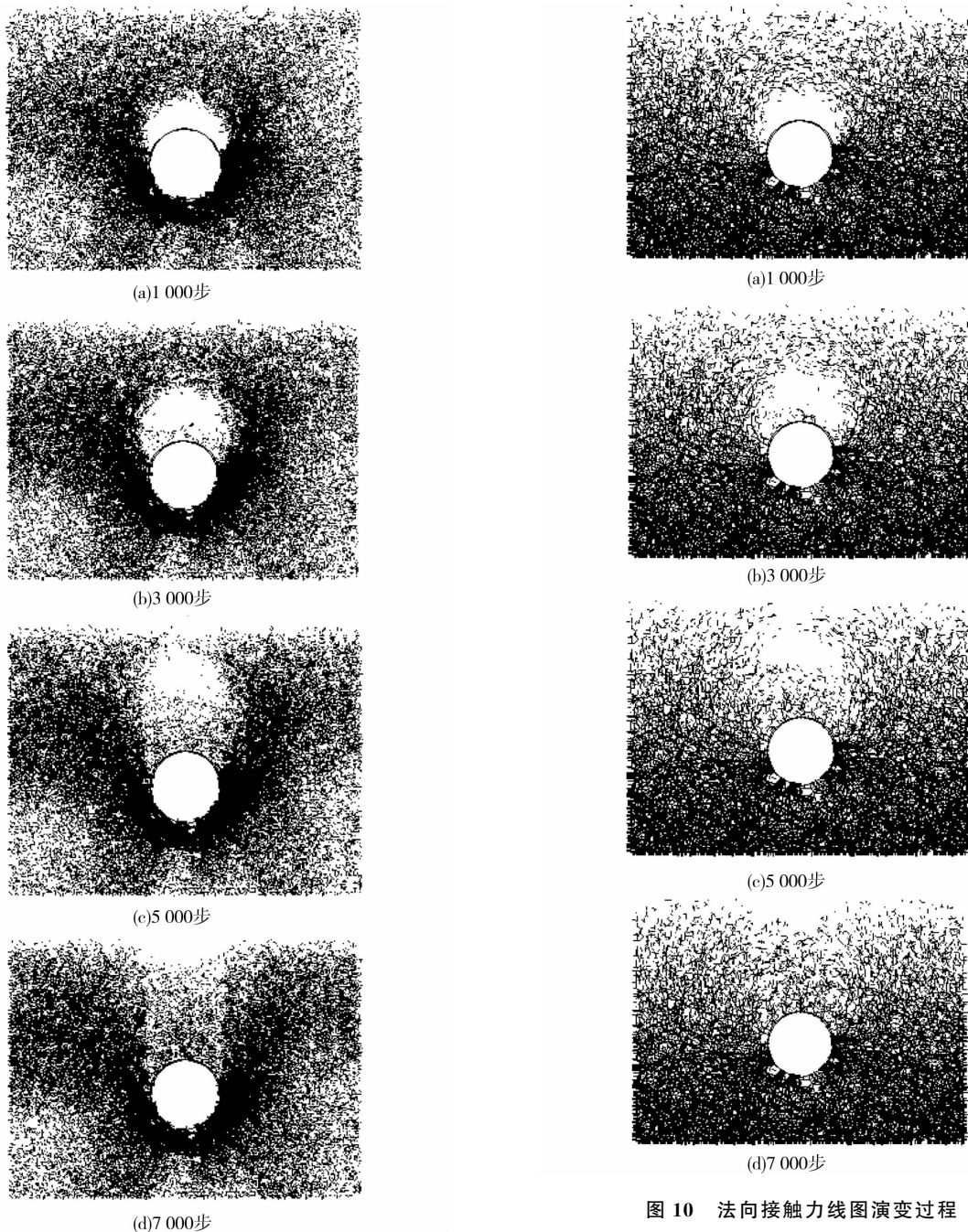


图 9 切向接触力线图演变过程

图 10 法向接触力线图演变过程

2) 盾构欠压掘进时, 开挖面土体松动现象明显, 开挖面前方的松动区形状基本为楔形体, 开挖面上方滑动区域的形状基本符合三维舱筒理论滑动面假设。

3) 随着支护压力比减小, 开挖面前方受扰动区域变大, 支护压力比减小到 0.12 时, 开挖面前方土层位移为 0.1 m 以上的颗粒之间接触力很低, 该区域土体发生失稳滑动, 开挖面颗粒进入崩塌滑落状态, 将形成一定范围的空洞。

4) 滞后塌陷的颗粒接触线力演变过程表明, 随着空洞的向地表移动, 空洞上方的成拱效应较为明显。

5) 由于土拱作用的存在, 盾构虽然超挖形成空

洞, 但并不会立即反应到地面。随着时间的推移和土体强度的弱化效应, 空洞会逐渐反应到地面。

6) 原状地层比较密实, 而掉落空洞底部堆积后的土体比较松散, 因此随着空洞向地表移动, 空洞的体积有所减小; 这也是超出土量比较少时, 空洞只能扰动地层而不能发展到地面的原因。

参考文献:

- [1] 罗松, 张浩然. 成都富水砂卵石地层盾构施工滞后塌陷防控措施探讨[J]. 隧道建设, 2010, 30(3): 317-320.
Luo S, Zhang H R. Discussion on prevention and control of delayed settlement induced by shield tunneling in water-rich sandy cobble stratum in Chengdu [J]. Tunnel

- Construction, 2010, 30(3):317-320.
- [2] 侯艳娟,张顶立,李鹏飞.北京地铁施工安全事故分析及防治对策[J].北京交通大学学报,2009,33(3):52-59.
Hou Y J, Zhang D L, Li P F. Analysis and control measures of safety accidents in Beijing subway construction [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009, 33(3): 52-59.
- [3] 范子福,李锋,杜胜华.川气东送武汉穿江盾构隧道地面塌陷勘察[J].人民长江,2009,40(5):77-79.
- [4] 李希元,闫静雅.盾构隧道施工工程事故的原因与对策[J].地下空间与工程学报,2005,1(6):965-971.
Li X Y, Yan J Y. Reasons and countermeasures of accidents happened during the shield tunnel construction [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(6):965-971.
- [5] 纪万斌,林景星,齐文同.塌陷与建筑[M].北京:地震出版社,1998.
- [6] 贺可强,王滨,万继涛.枣庄岩溶塌陷形成机制与致塌模型的研究[J].岩土力学,2002,23(5):564-569.
He K Q, Wang B, Wan J T. Study on forming mechanism of Zaozhuang karstcollapse and collapse model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 564-569.
- [7] 王滨,贺可强.岩溶塌陷临界土洞的极限平衡高度公式[J].岩土力学,2006,27(3):458-462.
Wang B, He K Q. Study on limit equilibrium height expression of critical soil cave of karstcollapse [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(3): 458-462.
- [8] 刘玉成,曹树刚,刘延保.可描述地表沉降动态过程的时间函数模型探讨[J].岩土力学,2010,31(3):925-931.
Liu Y C, Cao S G, Liu Y B. Discussion on some time functions for describing dynamic course of surface subsidence due to mining [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 925-931.
- [9] 李靖坤,李术希.地铁盾构隧道地表塌陷分析与对策[J].长沙铁道学院学报:社会科学版,2007,8(2):211-212.
- [10] 刘仁智.EPB盾构在地层掘进出现地表塌陷分析及处理[J].西部探矿工程,2005(10):99-100.
- [11] 马汉春,王旭,由伟,等.某地铁隧道盾构机始发阶段地面塌陷原因分析[J].现代隧道技术,2010,47(3):75-80.
Ma H C, Wang X, You W, et al. Cause analysis on the ground collapses during the launching period of a metro shield [J]. Modern Tunnelling Technology, 2010, 47(3): 75-80.
- [12] 张成平,张顶立,王梦恕.城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制[J].岩土力学,2010,31(Sup1): 303-309.
Zhang C P, Zhang D L, Wang M S. Catastrophe mechanism and control technology of ground collapse induced by urban tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup1): 303-309.
- [13] 杨书江,孙谋.富水砂卵石地层盾构施工技术[M].北京:人民交通出版社,2011.
- [14] 朱伟,秦建设,卢廷浩.砂土中盾构开挖面变形与破坏数值计算研究[J].岩土工程学报,2005,27(8):897-902.
Zhu W, Qin J S, Lu T H. Numerical study on face movement and collapse around shield tunnels in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 897-902.
- [15] 王明年,魏龙海,刘大刚.卵石地层中地下铁道施工力学的颗粒离散元法模拟技术及应用[M].成都:西南交通大学出版社,2010.
- [16] ASM Masud Karim. Three-dimensional discrete element modeling of tunneling in sand [D]. Edmonton: University of Alberta, 2007.
- [17] 王明年,魏龙海.成都地铁卵石层中盾构施工开挖面稳定性研究[J].岩土力学,2011,32(1):99-105.
Wang M N, Wei L H. Study of face stability of cobble-soil shield tunneling at Chengdu metro [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 99-105.
- [18] 黄正荣,朱伟.浅埋砂土中盾构法盾构开挖面极限支护压力及稳定研究[J].岩土工程学报,2006,28(11): 2005-2009.
Huang Z R, Zhu W. Study on limit supporting pressure and stabilization of excavation face for shallow shield tunnels in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 2005-2009.
- [19] Chambon P, Corté J F. Shallow tunnel in cohesionless soil: Stability of tunnel face [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(7): 1148-1165.
- [20] Kamata H, Masimo H. Centrifuge model test of tunnel face reinforcement by bolting [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2003, 18(2): 205-212.
- [21] Kjrsh A. Experimental and numerical investigation of the face stability of shallow tunnels in sand [C]// Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress, Kocsonya, 2009.
- [22] Itasca Consulting Group Inc. PFC3D (particle flow code in 3 dimensions) theory and background [R]. Minnesota, USA: Itasca Consulting Group Inc, 2002.
- [23] ASM Masud Karim. Three-dimensional discrete element modeling of tunneling in sand [D]. Edmonton: University of Alberta, 2007.
- [24] 蒋波,应宏伟,谢康和.基于土拱效应的筒仓土压力研究[J].科技通报,2005,21(5):624-632.
Jiang B, Ying H W, Xie K H. Study on earth pressure on silos based on soil arching [J]. Bulletin of Science and Technology, 2005, 21(5): 624-632.