

文章编号:1673-9469(2024)02-0071-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.02.010

黄土地裂缝区地铁隧道暗挖施工塌方机理及处治措施

任小平^{1,2}

(1. 中国铁建昆仑投资集团有限公司,四川 成都 610041;2. 中铁建云南投资有限公司,云南 昆明 650000)

摘要: 依托西安地铁3号线近接地裂缝区域的某暗挖隧道施工塌方案例,对引起坍塌的水文地质、施工行为诱因进行了分析。通过离散元软件进一步模拟隧道坍塌过程,发现隧道上部初支结构加速了“力链”的形成。在塌方案例中,通过一系列处治措施保证了土层结构安全,未引发次生灾害。现场监测数据有效地验证了险情处治方案的有效性。研究表明:地表降水为塌方重要诱因,软弱地层隧道暗挖时应保证隧道结构尽快成环,并确保底部土体的稳定。

关键词: 地铁隧道;浅埋暗挖;塌方;应对措施;现场监测

中图分类号:TG333.17

文献标识码:A

Collapse Mechanism and Treatments of Underground Excavation Construction of Subway Tunnels in Loess Fissure Areas

REN Xiaoping^{1,2}

(1. China Rail Way Construction Kunlun Investment Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610041, China;

2. China Railway Construction Yunnan Investment Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: Based on the construction collapse case of a hidden excavation tunnel near the ground fissure area of Xi'an Metro Line 3, the hydrogeological and construction behavior factors causing the collapse are analyzed. By further simulating the process of tunnel collapse using discrete element software, it is found that the initial support structure in the upper part of the tunnel accelerates the formation of the "force chain". In the collapse case, a series of treatment measures are taken to ensure the safety of the soil layer structure, without causing secondary disasters. The on-site monitoring data effectively verifies the effectiveness of the risk management plan. The research results indicate that surface precipitation is an important cause of collapse, and when excavating tunnels in weak strata, it is necessary to ensure that the tunnel structure forms a ring as soon as possible and ensure the stability of the bottom soil.

Key words: metro tunnel; shallow tunnelling; collapse; countermeasures; in-situ monitoring

地铁施工通常采用盾构的方式,但在地质条件变化较大时,例如地裂缝区域,不得不改用浅埋暗挖法。而暗挖施工对土体扰动较大,在工程区域邻近复杂地层环境时,极易发生工程事故。例如:2005年11月北京地铁10号线22标发生坍塌事故;2008年11月杭州地铁1号线塌方事故;2018年1月广州地铁21号线10标段水西至苏元区间左线(黄埔区)隧道塌方,导致3名人员死亡。对工程地质的准确了解是防止塌方的重要前提,

但由于岩土介质相当复杂,在隧道施工前很难准确掌握其物理力学性能,并相应地设计合适的材料和结构参数。为了最大程度保证施工安全,隧道工程结构安全系数通常大于2,但过高的安全系数无疑造成了不必要的浪费。因此,准确评估当前工程安全状态,并采取一系列施工优化措施减小风险,是目前亟待研究的问题。

目前,关于隧道塌方防治研究集中在三个方面:基于数据分析的塌方风险评估、基于力学的塌

收稿日期:2023-07-07

基金项目:中国铁建昆仑投资集团有限公司科技研究开发计划项目(KLTZ-KX01-2020-009);陕西省重点研发计划项目(2023-YBSF-511)

作者简介:任小平(1975-),男,重庆云阳人,硕士,高级工程师,主要研究铁路、公路建设项目管理方向。

方风险分析、基于现场经验的结构支护参数优化。在基于数据分析的塌方风险评估方面,贝叶斯理论、层次分析法、机器学习等模型均被使用,取得了一定效果^[1-4]。在力学手段方面,极限平衡法、数值模拟以及模型试验被用于塌方过程分析^[5-9]。基于现场经验的结构支护参数优化有助于形成可靠的工程规范,并且为机器学习提供数据支撑^[10-12]。

然而,上述数据分析、力学计算和支护优化并非对所有情况都有帮助。对于不同的塌陷形式、地质环境和结构类型,更多的案例将有助于理解塌方原因并形成系统的防治措施。此外,塌方后的处治措施及其效果也应当被更多讨论。基于此,本文依托西安地铁3号线胡通暗挖区间塌方事故,从地质和施工等角度分析了其破坏机理,并介绍了塌方处治措施及效果。该研究可为浅埋隧道暗挖或黄土地裂缝地区塌方等类似工程提供参考。

1 工程概况

1.1 项目位置

该案例依托工程为西安地铁三号线通化门—胡家庙区间盾构隧道工程,其经过了F4西安地裂缝带。该区间处于西安市金花北路地下,该区段沿线建筑林立,先后下穿通过三栋高层建筑物,并且沿线市政管廊和管线众多,人流车流密集,环境复杂。区间盾构采用明挖法进行开挖,起始于F4地裂缝南边一侧,浅埋暗挖段采用单导洞马蹄形。西安地裂缝的分布和该区间各施工段如图1所示。

1.2 地质环境

根据工程现场地勘资料和现场开挖取样,综合判断该区段穿越的地层主要为饱和软黄土、古土壤和老黄土。饱和软黄土呈软塑—流塑状,土质均匀,孔隙发育,含零星蜗牛壳碎片,属中压缩性

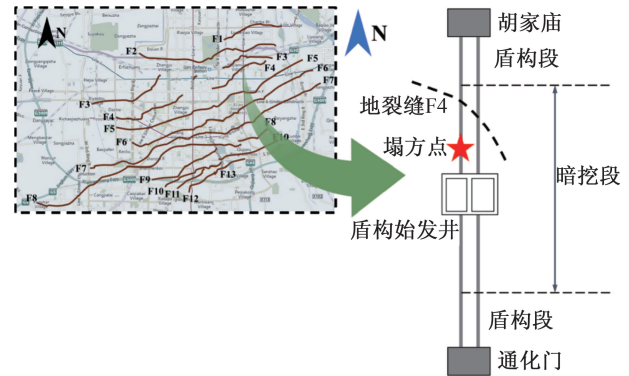


图1 暗挖隧道位置与周边环境

Fig. 1 Tunnelling position and surrounding environment

土;古土壤呈可塑状,钙质结核含量较多,局部成层分布,属中压缩性土;老黄土呈软塑—流塑状,土质均匀,少量孔隙,属中压缩性土。沿线地层分布和地裂缝F4的位置如图2所示。

该区段水文地质相对复杂,地表湖泊较多,在区间场地西南侧、东南侧、北侧均有分布,最近的湖泊距离区间场地约1 km,水深约2 m,水面高程约408 m。同时,地下水对本区间隧道地铁施工的影响不可忽视,影响最大的为地下潜水,根据现场地质钻探显示,潜水层水位约为地下9.5~11.6 m,地下潜水稳定水位埋深约在10.4~15.6 m之间。根据西安长期水位观测资料,勘察时接近水平位期,拟建场地的地下水主要接受大气降水及侧向地下水径流补给,潜水排泄方式主要为侧向径流排泄。

1.3 暗挖施工方案

西安地铁三号线通化门—胡家庙区间穿越了西安4号地裂缝,采用暗挖法施工。暗挖法主要采用“短台阶+临时横撑法”,即在上台阶开挖完之后,在上下台阶之间设立临时横撑,以限制洞内的水平位移,然后再开挖下台阶。超前注浆采用钢管外径 $\Phi 42$ mm×壁厚3.5 mm、长度 $L=3$ m的小

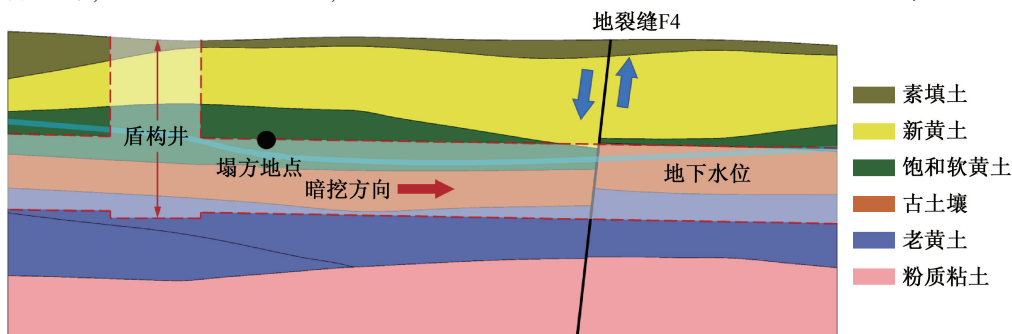


图2 地层环境与工程位置

Fig. 2 Stratigraphic environment and project position

导管,环间距为 0.3 m。暗挖隧道的施工断面及支护参数如图 3 所示。

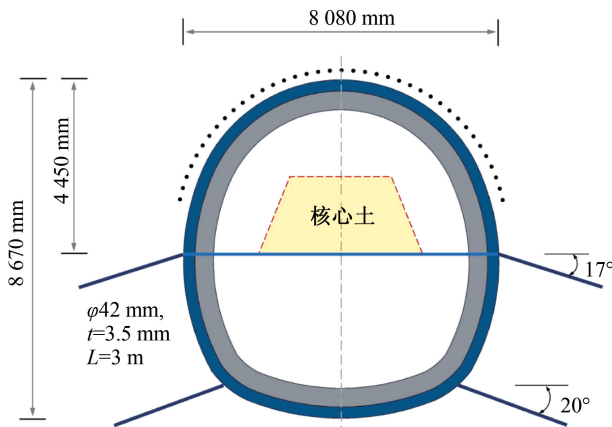


图 3 隧道支护参数

Fig. 3 Support parameters of tunnels

2 坍塌过程及原因分析

2.1 现场塌方情况

事故现场位于东二环桥与胡家庙十字西南角约 300 m 的地铁 3 号线暗挖左线隧道中(图 1)。事故发生后,隧道整个上部拱形支护结构塌落,洞口拱顶塌落高度约 3.2 m;在核心土位置处出现剪断,剪断长度为 2.4 m,塌落高度约 2.4 m。隧道衬砌结构破坏后的剖面如图 4(a)所示。衬砌破坏隧道左侧上方土方坍塌较严重,出现空洞。现场情况如图 4(c)所示。隧道在坍塌前没有出现任何明显的征兆,通过现场监测数据判断,本次塌方类型为界限破坏。在塌方发生以后,距事故较近的地表测点发生了较大的沉降,最大约 12.6 cm,隧道塌方严重影响地表。

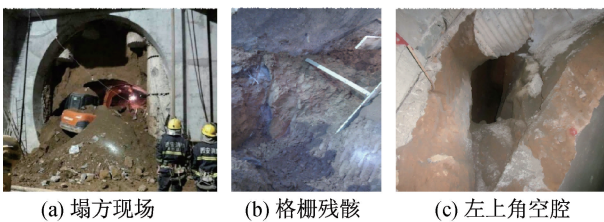


图 4 现场情况

Fig. 4 On-site situations

2.2 坍塌原因分析

2.2.1 地质水文因素

软黄土、古土壤等较软土层中的围岩,其抗剪力能力很差,呈流塑状,自稳能力差,具体过程如图 5 所示。在水的侵蚀作用下,会改变和破坏土体原有结构,导致土体内部的黏聚力 c 、摩擦角 φ 值

降低甚至为零,进一步地削弱了土层的抗剪能力。在隧洞开挖临近土体抗剪强度较低的地段时,出现临空面,土体中的应力得到释放,对软弱土体施加剪切力,软弱结构面难以承受该剪切作用发生塑性滑移或沿着层面滑动,导致坍塌的发生。如果在掌子面区域存在大量软弱土体,或者该区域前方的土体稳定性同样较差,那么土体变形将进一步地扩展,塌落面上移,直至相对较稳定的土层或路面发生大面积坍塌。

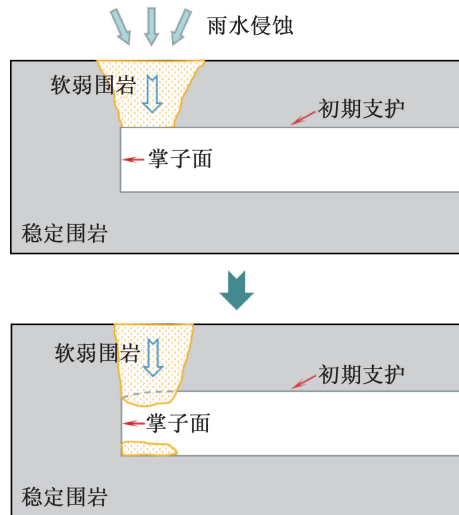


图 5 地质水文因素导致的塌方过程

Fig. 5 Collapse process caused by geological and hydrological factors

2.2.2 施工因素

(1) 超前注浆加固参数不合理

超前加固常采用超前小导管注浆方式进行,如果在注浆过程中,出现注浆管长度过短、注浆压力过小等情况,这将致使注浆作业达不到预期效果,导洞开挖过程中极易发生松散土体坍塌。通过浆液的填充和胶结作用,将土体颗粒黏结在一起,从而增加土体的黏聚力和摩擦角,提高土体的稳定性以确保暗挖施工的安全。如果注浆效果无法达到预期要求,则土体的整体性将无法得到明显改善。在临空面形成时,土体侧面约束力的释放,土粒之间的相互作用会减弱,土体变得松散,对暗挖施工的安全构成威胁。注浆浆液的微观机理注浆浆液渗流和扩散的微观机理如图 6 所示。扩散一般有三种类型:A 为沉淀(吸附);B 为阻滞;C 为扩散。

(2) 上台阶开挖进尺过长

浅埋暗挖施工中应严格控制开挖进尺。导洞开挖进尺间距应与格栅纵向间距相符,确保初期

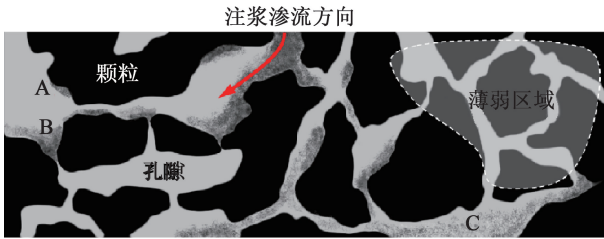


图6 超前注浆加固机理

Fig. 6 Mechanism of advanced grouting reinforcement

支护正常进行,降低土体开挖对隧洞周围岩的扰动。开挖进尺过大则将增大临空面,进而加大对隧洞周围围岩扰动作用,增加坍塌的风险。当隧洞开挖面应力得到释放后,掌子面前方土体由于侧压力的减小而引起应力在空间上的重分布,并导致临空面发生不同程度的蠕变侧移,最终导致隧洞发生坍塌。如果一次开挖的进尺较大,临空面的大小会增加,同时掌子面的暴露时间也会相应增长,从而增加了坍塌的风险。

(3) 初期支护施工不及时

就松散破碎围岩,其初期支护需要较大的刚度且应尽快封闭成环,封闭成环保证围岩相对均匀受力变形,降低坍塌事故发生概率。初期支护尽快封闭,即形成一个封闭环来更好地平衡导洞各方土体对初期支护施加的土压力,增强工程的安全性。如导洞上台阶初期支护施工较快,下台阶初期支护不能及时跟进,那么导洞上部土体的压力将只作用于上台阶初期支护,而台阶土体的承载能力通常不足以平衡该压力,这将导致未封闭段上台阶初期支护发生较大的沉降甚至坍塌,影响进一步施工。

3 坍塌过程模拟

利用矩阵离散元软件对塌方过程进行模拟,

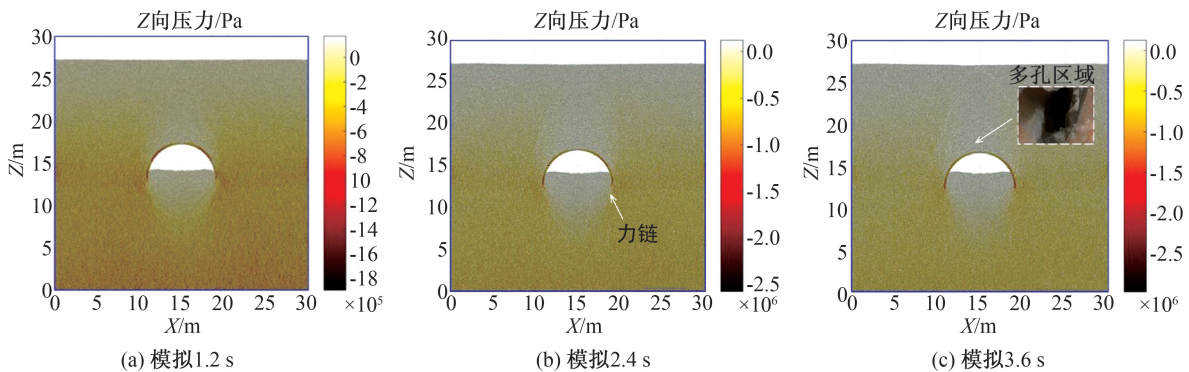


图7 离散元模型中的模拟过程

Fig. 7 Simulated process in the discrete element model

进一步探究隧道坍塌过程的原因和其机理。离散元软件将土体划分成为离散的球单元进行模拟,它可以有效地描述岩土工程中的大变形和破坏行为。离散元模型的一个关键步骤是将宏观尺度的物理参数转换为中尺度的参数。通过虚拟三轴试验不断调整微观参数,使模型的宏观特性达到预期水平。根据地质探测结果,选取了混凝土剪切破坏的截面,建立了离散单元模型。仅在该横截面中设置了上部混凝土支架。所用材料(包括土壤和混凝土结构)的宏观特性可在相关文献[13]中找到。坍塌模拟过程如图7所示。

结果表明,隧道上部支护处的土体破坏是隧道塌方的直接原因。在最初的初支结构落入土壤之前,底部附近的土壤已经形成“力链”并向下延伸,破坏土壤结构。模拟结果与第2.2.2节中的分析结果一致。支架下沉后,由于土壤的摩擦阻力,力链几乎消失。力链已在实际岩石和土壤中得到证明^[14],但很难在有限元软件中进行模拟。因此,在这方面,离散元软件比有限元软件更能揭示土壤破坏的原因。

4 塌方处治方案

4.1 紧急处治措施

经验表明,如果在隧道塌方后不及时处理,尤其是像本案例中的浅埋隧道,二次塌方可能发生,并且危及地表结构的安全。采用挖掘机和人工清理渣土,救援被埋人员,同时在顶部塌土区域悬挂钢筋网、打入锚杆,并且用喷射混凝土封闭。锚杆2.0 m长,直径为25 mm,采用C25喷射混凝土,厚度10~15 cm,保证上部土体稳定,确保下方抢险人员的人身安全。

4.2 洞内处治措施

内段是风险比较高、需要被紧急处理的区段。首先对掌子面地区进行处理。采用直径为 6.5 mm 的钢筋网片满铺在掌子面土体上,按 1 m 间距梅花形布置 3.0 m 长直径为 25 mm 的钢筋锚杆。锚杆与网片进行焊接,待焊接全部完成后,再喷射 15 cm 厚 C25 喷射混凝土。通过上述处治,封闭了掌子面处于自由状态的土体,减少固结变形。同时与钢筋网焊接在一起的钢锚杆将掌子面前后一段范围内的土体连接为了一个整体,增大了纵向刚度。掌子面封闭处理过程如图 8 所示。

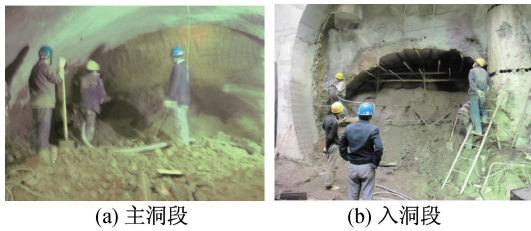


图 8 掌子面封闭处理

Fig. 8 Closure treatment of tunnel excavation face

对掌子面处理完成后,在原有初支结构上架设高度为 220 mm 的临时工字钢横撑,临时横撑可以有效限值洞内两侧的水平位移。在塌方后的地面上铺设钢筋网片,并喷射 35 cm 厚的 C25 喷射混凝土,增大隧洞地基的稳定性。塌方后,在隧道内左侧上方出现了一处空洞。首先,在该空洞部位悬挂钢筋网片,网片与附近外露出的锚杆焊接。同时,预埋 3 根 4 m 长 $\Phi 42$ 小导管,留作后备回填注浆管。喷射 C25 喷射混凝土,保持注浆管的管口露出,确保了注浆密实。最后,对坍塌隧道内进行喷射混凝土进行填充,方量约 70~80 m³。大量的填方使洞内的沉降几乎减为零,最大程度地保证安全。考虑到该区域地层的极端不稳定,除了塌方的隧道,该线路上其他正在施工的隧道掌子面全都进行喷射混凝土和锚杆封闭加固。洞内处治措施如图 9 所示。

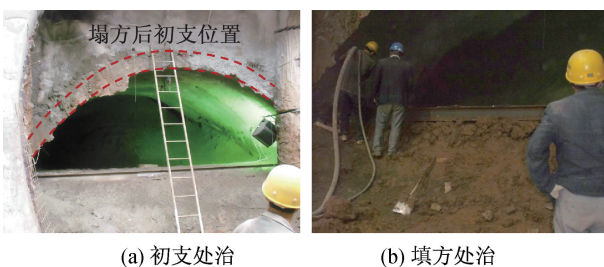


图 9 洞内处治措施

Fig. 9 Treatments in the tunnel

4.3 洞口处治措施

在洞内完全用喷射混凝土填充完之后,开始对洞口进行了一系列综合的处治。首先在洞口偏下部分架设了三根工字钢支架,并用竖直的钢筋焊接,将其连接为一个整体。工字钢的托架是弯曲的钢筋,其在现场便于制作与安装。工字钢与钢筋连接好之后,把钢筋网片架焊接在它们上面,对这部分进行喷射混凝土填充。在洞口段进行了大量喷射混凝土填方后,底部土体可能因承载力不足而产生破坏。因此,洞口最底部的土体被挖除,并且架设了工字钢以支撑上部荷载。洞口处治流程如图 10 所示。

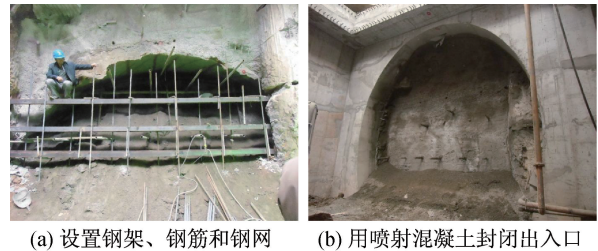


图 10 洞口处治措施

Fig. 10 Treatments at tunnel portal

4.4 地表加固措施

由于该区段采用暗挖的方式修建,埋深较浅。在隧道内发生塌方之后,地表很容易受到扰动甚至出现贯穿到隧道内的空洞。地表范围内一共有两处空洞,分别位于龙门架北第三道立柱接近中部和土仓内。这些空洞说明了隧道塌方已经使地表的土体变得松散、不稳定。但在洞内的填筑混凝土达到强度前,不宜直接在地表空洞处注浆,以防止浆液渗漏至洞中,对隧道地基造成额外的压力。待下部各项加固混凝土强度达到后,对空洞回填 C15 水泥砂浆。地表空洞及其处治措施如图 11 所示。从地面对下方土体进行全面注浆加固处理,注浆浆液采用水泥-水玻璃双浆液,钻孔孔深为 13 m。在从地面进行回填注浆加固的时候,地层中松散土体沉降较为严重。因原塌方区域内有通讯光缆,为保证不对通讯光缆造成破坏,同时避免沉降过大导致的二次塌方,注浆加固被暂停,对通讯光缆进行转移处治。在塌方区域内的地表四周砌筑 50 cm 高挡水墙,防止外侧雨水倒灌塌方空洞,避免再次塌方。

5 处治效果分析

为防止二次垮塌,在邻近地表布设沉降监测

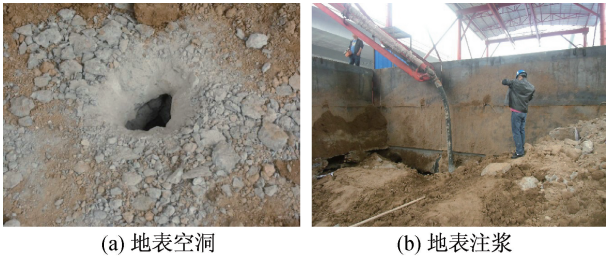


图 11 地表处治措施
Fig. 11 Treatment on surface

点,从盾构始发井南侧到 4 号地裂缝附近,其中还包括了对邻近建筑的沉降测点(图 12)。处治措施如注浆、填方等耗时较长,针对这些处治措施需要较长的监测。前期的监测频率约 10 次/d;中后期的监测频率约为一天 3~5 次。选取邻近建筑、盾构始发井南侧地表和隧道沿线作为关键测点绘制沉降曲线如图 13 所示。

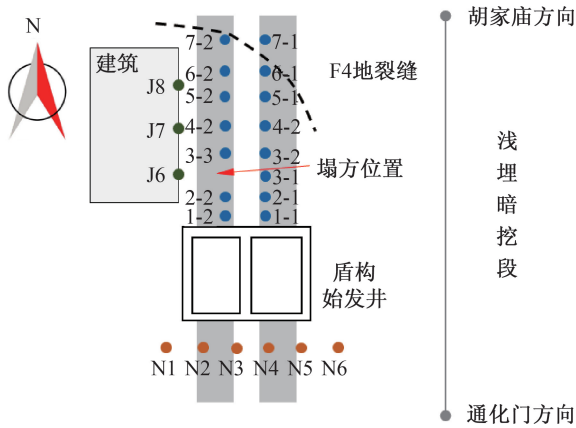
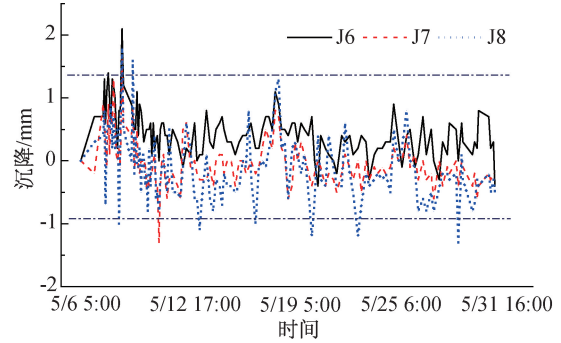


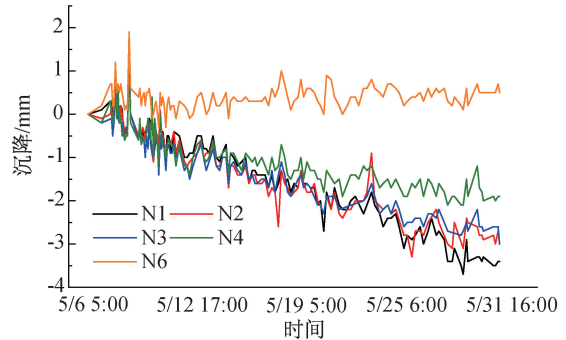
图 12 地表测点分布
Fig. 12 Distribution of surface settlement monitoring points

三个地表监测带点都表现出了一定的波动性。一系列的处治措施使得这些点的沉降曲线是小幅度波动的,不像一般的开挖沉降曲线是累计递增的。在如此微小的尺度下,测量误差的因素也不可忽略。这些波动也可能是误差导致的。三个点之间波动的一致性也可以间接验证测量是有效和准确的。此外,高程变大的时间与洞内注浆的时间基本吻合,这进一步说明了这些微小的变化幅度是由于这期间一系列的施工处治措施导致的。注浆压力会使得地表轻微地隆起,一定时间后,地表高程回落到正常水平。

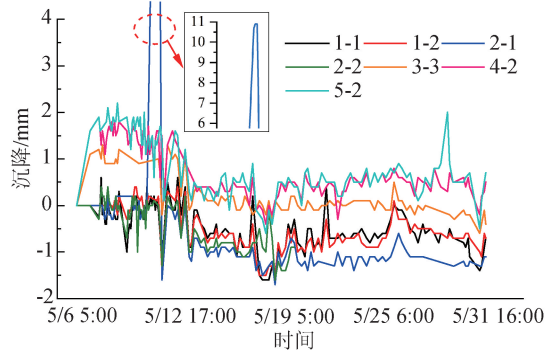
从图 13(a)的 J6—J8 测点的沉降情况,能够看出地表建筑的沉降变化幅度在 2 mm 内,十分微小。建筑沉降没有明显的沉降趋势,竖向变形都是围绕在 0 mm 线上。这表明这些处治措施是有



(a) 邻近地表建筑沉降监测



(b) 盾构始发井南侧地表监测



(c) 暗挖隧道沿线地表监测

图 13 地表监测曲线

Fig. 13 Surface monitoring curves

效的,没有进一步引起沉降的增大。各点之间的差异沉降在监测全周期始终保持在 1 mm 以内,没有明显的突变点,这反映了建筑整体没有局部风险较高的部位,建筑结构安全。

通过图 13(b)盾构始发井南侧地表监测情况,明显看出 N1/N4 具有相似的规律而离塌方点最远的 N6 与他们截然不同。N1—N4 在波动中整体呈现出连续下降的趋势。这期间这些点位下方的隧道已经停止了施工,因此这种沉降可能是之前开挖的土体持续产生的应力释放。这种现象在 N6 处明显消失,其没有持续性的沉降,只随着处治措施上下波动。塌方暗挖隧道上方沿线布置的监测结果显示,靠近塌方的点振动幅度较大,因为它们更容易受到处治措施的影响。

隧道沿线地表监测情况见图 13(c),从中能够看出隧道沿线的沉降变化幅度在 4 mm 以内,但 2-1 测点的监测数据出现了短暂的异常,当日隆起量接近 11 mm 且迅速恢复正常,很可能是测量误差导致的。通过对比 2-1 测点和 4-2 测点的曲线,靠近塌方的点不仅振幅较大,其最终的高程偏高,因为大量的注浆填充会使得地表产生明显的隆起。这也表示塌方处的地层已经被加固,减少了二次塌方的风险。综合建筑与地表的监测结果,可以证明基本没有二次塌方的隐患。在裂缝地区浅埋暗挖隧道出现塌方时,以上的处治措施是有效的。但是,这次处理的主要不足是在处治过程中,参数计算(如注浆量)不够精确。例如有的地方已经产生了过度隆起,但有的地方还在持续沉降。这也是未来在岩土工程中需要研究的问题。

6 结论

1)连续降雨案例隧道塌方的主要因素,土体受侵蚀进而无法承受相应荷载从而产生破坏。在富水地裂缝软弱地区暗挖隧道需使支护结构尽快成环封闭,避免底部局部应力过大。

2)通过离散元软件模拟坍塌过程,发现初期支护结构搭建前,支护结构附近的土壤已发生“力链”现象,并向下进行延伸,确定隧道坍塌的直接原因是隧道上部初支结构底部的土体发生破坏。

3)塌方之后需准确判断受扰动的区域,为防止次生灾害,建议对洞内、洞口和地表进行一系列综合的处治措施。掌子面封闭是洞内处治的重点,而地表处治是因为浅埋隧道塌方可能引起的地层空洞问题。

4)现场监测数据表明案例处治措施有效,沉降未进一步增大。各点之间的差异沉降在监测全周期始终保持在 1 mm 以内,没有明显的突变点,这反映了地表邻近建筑整体没有局部风险较高的部位。在采用注浆加固时,不合理的注浆量使局部区域产生了过度隆起,需进行更精确的研究和计算。

参考文献:

[1] OU X, WU Y, WU B, et al. Dynamic bayesian network for predicting tunnel-collapse risk in the case of incom-

plete data[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2022, 36(4): 04022034.

- [2] YU Y, HE X, WAN F, et al. Dynamic risk assessment of karst tunnel collapse based on fuzzy-AHP: A case study of the LianHuaShan tunnel, China[J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022: 4426318.
- [3] 乔晓青, 杨云. 基于粗糙集和风险矩阵的隧道施工塌方风险评估研究[J]. 公路与汽运, 2021(06): 162-167.
- [4] 郝晓鹏. 高速公路隧道工程中的安全风险及施工管理措施[J]. 工程技术研究, 2021, 6(21): 157-158.
- [5] 于晨昀, 项彦勇, 孙俊豪. 临近富水破碎构造带隧道开挖面稳定性的极限平衡分析[J]. 水利水电技术, 2020, 51(S2): 380-384.
- [6] 郭子红, 钟祖良. 浅埋隧道破裂面的极限平衡分析法[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(05): 1228-1233.
- [7] 陈稳. 土质围岩隧道塌方规律及开挖面极限支护力分析[D]. 北京:北京交通大学, 2021.
- [8] 张坤鹏. 地铁隧道施工影响下土岩复合地层渐进破坏模式及演化规律[D]. 青岛:青岛理工大学, 2021.
- [9] 赵立财. 隧道围岩中注浆锚杆的应力分布及影响因素研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(03): 63-68.
- [10] WU B, QIU W, HUANG W, et al. Dynamic risk evaluation method for collapse disasters of drill-and-blast tunnels: A case study[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2021, 19(1): 309-330.
- [11] 潘春辉, 陈光仔, 牛俊涛, 等. 山岭隧道侵入岩与围岩接触带中小型塌方综合处治施工技术[J]. 中外公路, 2021, 41(S2): 148-150.
- [12] SRIVASTAV A, PANDEY V H R, KAINTHOLA A, et al. Numerical analysis of a collapsed tunnel: A case study from NW Himalaya, India[J]. Indian Geotechnical Journal, 2022, 52(1): 132-144.
- [13] LIANG Y, CHEN X, YANG J, et al. Analysis of ground collapse caused by shield tunnelling and the evaluation of the reinforcement effect on a sand stratum[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 115: 104616.
- [14] MCBECK J, MAIR K, RENARD F. How porosity controls macroscopic failure via propagating fractures and percolating force chains in porous granular rocks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2019, 124(9): 9920-9939.

(责任编辑 周雪梅)