

管线渗漏对粉黏土地层中暗挖法地铁结构的影响分析及防治措施

李 利

中铁第六勘察设计院集团有限公司 天津 300308

【摘 要】：针对某市地铁施工过程中地表塌陷事故进行了案例分析，得出在第四系粉黏土地层中，管线渗漏诱发的地面塌陷的形成机理，并分析了地铁暗挖法施工引起的管线沉降变形特征，进一步研究了管线渗漏对地铁隧道掌子面稳定性的影响，最后给出了本地区地铁施工过程中防治管线渗透引发地面塌陷的方法，可为类似地层中地铁施工提供一定的借鉴意义。

【关键词】：第四系粉黏土；地铁施工；管线渗漏；地面塌陷；管线沉降变形特征；掌子面稳定分析；防治措施

1 引言

近些年来随着信息网络化的普及，人民对城市地铁建设安全的要求逐渐提高。一些地铁工程事故会在短时间内迅速通过网络扩大，尤其是地面塌陷类事故，不仅给地铁建设带来巨大压力，而且也往往造成生命和财产的损失。

地铁建设暗挖法一般采用浅埋暗挖法和盾构法施工，由于盾构法安全度较高，一般管线渗漏对盾构安全施工的影响较小，故本文主要针对采用浅埋暗挖法施工的暗挖隧道。随着某市地铁工程建设的不断推进，近些年来出现了较多地面塌陷事故。经过统计分析，某市地面塌陷事故一个主要原因是管线渗漏引发的地面塌陷。仅 2021 年 8 月，就连续发生 3 起因雨污水管渗漏而诱发的地面塌陷，社会反应非常强烈。因此，有必要对雨污水管渗漏而引发的地铁事故进行认真研究分析，寻找应对办法，避免后续工程发生类似事故。

为此，通过对某市 M 地铁车站 PBA 小导洞地表塌陷事故和 G 区间地表塌陷事故进行案例分析，分析得出了在第四系粉黏土地层中，管线渗漏诱发的地面塌陷的形成机理，并研究分析了地铁暗挖法施工对管线沉降变形的特征，进一步研究了管线渗漏对地铁隧道掌子面安全稳定影响，最后给出了本地区地铁施工过程中防治管线渗透引发地面塌陷的方法，可为类似地层中管线渗漏的治理和地铁安全施工提供一定的借鉴意义。

2 雨污水管渗漏诱发的地面塌陷案例及分析

2021 年 8 月 1 号傍晚，某市某主干道的辅路位置突然发生塌陷，路面形成一个长 5.5m，宽 4.5m，深约 3.5m 的塌陷坑，坑内有水渗出（见图 1）。所幸人员发现及时，并及时采取了封闭辅路和部分主路，人员和车辆采取绕行通过等措施，未造成人员伤亡。塌陷范围内有地下暗挖法区间开挖，并且塌陷前几天刚刚下过一场大雨。

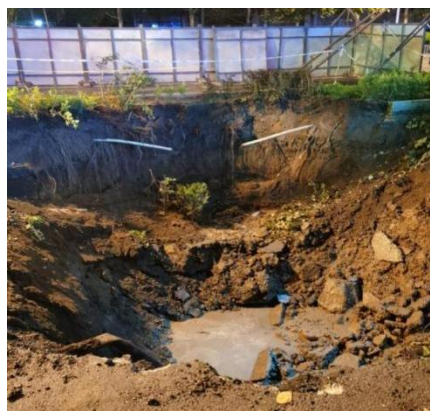


图 1 管线渗漏引发某道路地面塌陷

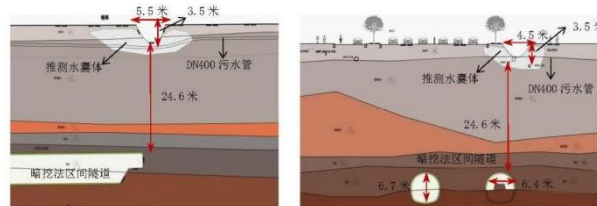


图 2 某地铁区间地面塌陷剖面图

塌陷位置路基下存在两条 DN400 雨污水管。地下 3m 内为杂填土，其下为 2 层粉质黏土，再下面基岩层为白垩纪泥岩层。地铁区间距离塌陷坑底约为 24.6m，具体剖面关系如图 2 所示。地表塌陷一方面是因为杂填土层内存在两条 DN400 雨污水管，该水管建成年代为两千年初，采用平口对接，管线接口位置长期渗漏，在渗漏点附近形成了水囊；另一方面是因为地铁线路从管线附近侧下方穿越，形成了地面沉降，进一步使得管线变形加大，发生更大的破损渗漏。加之近期强降雨，使得管线内的雨污水流量加大，带走了管线周边泥沙而形成空洞，造成了污水管断裂，污水外涌冲走了路基下的长期浸泡的粉黏土层而造成路面突然塌陷。由于区

间位于地面下约 30m，地下水囊与地铁区间之间夹土层足够厚，能够承担水囊和软弱土体所产生的附加荷载，故本处地面塌陷并未对地铁区间开挖洞室产生影响。

2021 年 8 月 16 号晚，某市主干道附近的人行行步道出现直径 40cm 塌陷，地铁现场施工单位组织人员对道路辅路及人行道进行封堵，并对塌陷处进行围挡，围挡过程中塌陷逐渐扩大，周围积水汇入基坑。现场塌陷逐渐扩大，最终形成长 9m，宽 8m，深约 5m 的塌陷区（见图 3）。附近地铁车站东端导洞内涌入大量水土，致使车站上层南侧边导洞和东端横导洞被土体堵塞（见图 4）。所幸发现及时，并迅速在地面采取封路绕行措施，同时在地铁导洞内及时进行洞内支护加固，没有出现人员伤亡情况。



图 3 管线渗漏引发人行道地面塌陷



图 4 地铁车站小导洞内涌入大量水土

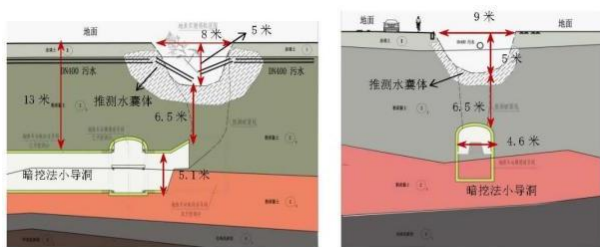


图 5 某小导洞地面塌陷剖面图

塌陷位置路基下存在一条 DN400 雨污水管，该位置污水管为南北和东西向的交汇处。地面下 2m 为杂填土，其下为 2 层粉质黏土，再下面基岩层为全风化砂岩和泥岩，地铁暗挖小导洞距离塌陷坑底约为 6.5m，具体剖面关系如图 5 所示。

本次地表塌陷与 8 月 1 号地表塌陷事故原因类似，主要原因是雨污水管线老化，长期渗漏，同时由于覆土浅，地铁施工加剧了管线变形，再加之近期强降雨共同诱发了本次塌陷事故。

3 雨污水管渗漏诱发地面塌陷的成因

某市区存在大量老旧雨污水管线。这些管线一般雨污合流，材质主要为钢筋混凝土，接口形式一般为平口和承插口。这部分管线由于建设年代较早，年久失修，加之雨季突发的强降雨以及地层因施工产生变形等综合影响，普遍存在较为严重的渗漏水现象，如图 6 所示。



图 6 雨污水管长期渗漏

雨污水管渗漏主要包括以下几个方面原因：1）管线自身质量问题而导致的渗漏，如接头质量不足，管线局部强度不够而破洞等等；2）管线在使用过程中一些杂质在管道内沉积而堵塞管道，降低管道内水流量而增大水流压力，从而引发管线渗漏；3）外部因素引发管线附加变形，引起管线破裂，错口，脱节等等，这些外部因素包括管线附近的地铁施工，地面过大交通荷载等等。

管线破坏形式有很多种，根据 L.smith 等^[1]研究总结，将市政管线破坏划分为四种形式：即管线自身环向破裂、管线自身纵向破裂、管线承接口破裂、管线壁穿孔破裂。在管线受力破坏的形式研究上，Clarke^[2]系统总结并证实了 5 种管线的受力破坏形式，如下图所示：

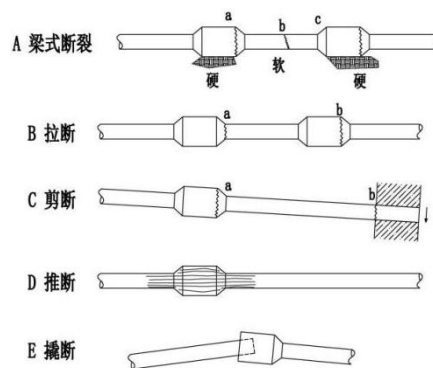


图 7 管线受力的破坏形式

雨污水管线的渗漏，一方面使得污水浸泡管线周边的土体，逐渐形成软弱土体和水囊。另一方面，管线内的水力作用会将管线周边的软弱土体冲刷带走而形成空洞，从而引发地面塌陷。

此外，污水管渗漏还与本地区的地质条件有着密切的联系。一般污水管埋深较浅，处于路基下的杂填土内。若杂填土下部土层为渗透系数较小的弱透水层或隔水层，则杂填土内的管线渗漏水可以不断地汇聚形成水囊而不至于短期消散；若杂填土下部土体为砂土等渗透性较高的土体，因地铁暗挖施工过程中普遍采用降水方式，管线渗漏水可以比较顺畅的排走，则不容易形成水囊。

某市地层上部覆盖层主要为第四系黄土状土，从工程地质性质上可以分为两个大地层，即褐黄色的软塑~可塑的粉质黏土（包含部分淤泥质粉质黏土）的地层及第二层褐黄色的硬塑~坚硬的粉质黏土及粘土层^[3-4]。一般地铁暗挖结构主要位于粉质黏土层②2和粉质黏土层②3中。上述粉质黏土和粘土渗透系数小，一般为0.1~0.5m/d，固结条件好，为超固结土，压缩性中等偏低，水平层理不发育，而垂直节理发育^[3]。

该地区雨污水管一般位于地表下3m内，土层主要为松散型杂填土或可塑粉质黏土，下部为固结较好的弱透水性质的粉黏土。管线的渗漏很容易在管线周边形成水囊。此外，在雨季的8、9月份，强降水会加剧管线渗漏，使得水囊体积迅速增大，在水力作用下冲刷管线周边受浸泡土体，带走大量泥土，而产生地面塌陷。

4 地铁施工对雨污水管沉降变形的影响

城市地铁隧道一般埋深较浅，隧道开挖会引起围岩受力变形和地层损失而使得地表出现沉降。地铁开挖引起的地层沉降受围岩的不均匀性以及施工过程差异性等因素影响，地表沉降变形规律难以精确判定。在工程应用领域，多采用半经验半理论公式进行预测分析。

在众多预测地铁隧道开挖引起地表横向位移的经验方法中，R B peck 于 1969 年提出的方法无意是最简便、应用最广泛的方法^[5]。Peck 指出沉降曲线在横剖面上为正态曲线分布，如图 8、9 所示，地面任一点的沉降值

$$s = s_{\max} \exp\left[-\frac{x^2}{2i^2}\right]$$

式中 $s_{\max}$ 为地面沉降的最大值，位于

隧道拱顶正上方； x 为从沉降曲线中心到所计算点的距离； i 为沉降槽宽度。

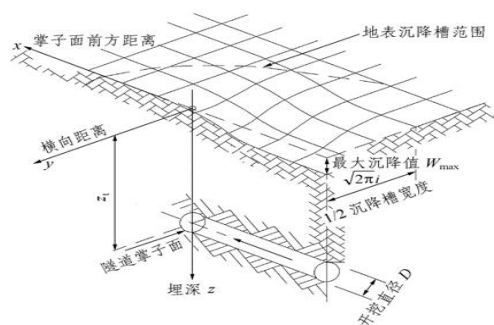


图 8 地表沉降槽示意图

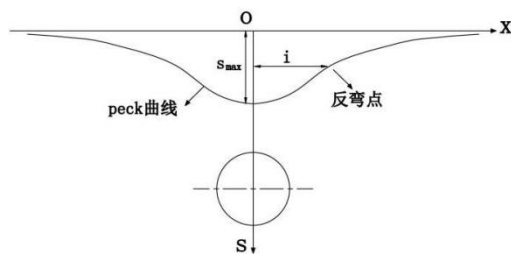


图 9 peck 沉降曲线

此外，在隧道洞室纵向上地表沉降变形分析方面，地表沉降曲线也具备反弯点的曲线变形特点，并且可分为 4 个阶段^[6]：

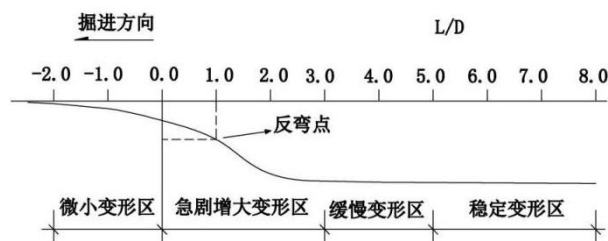


图 10 地表沉降纵向变化规律

由于土体与管线刚度差异显著，隧道开挖引起的地表变形特征并不能使管线也随之相应变化。地层与管线变形的不统一必然使得管线产生附加受力而使得管线破损和开裂，进而引发渗漏。在上述地层两个方向沉降槽的变形特征下，管线渗漏最严重、最可能发生的位置往往出现在地层变形最剧烈的位置，即反弯点附近。在隧道开挖横剖面方向的破坏形式，如下图 11 所示。在隧道的纵向的管线破坏，主要发生在距离开挖面 2 倍洞径范围附近。

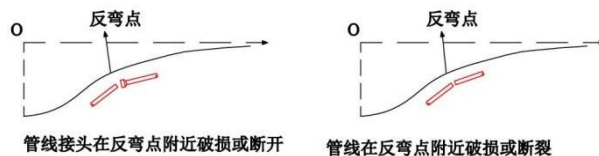


图 11 隧道开挖引起管线变形破坏最可能发生的位置

此外,一般道路下方的市政管线为便于检修和更换,主要位于辅路和人行道下方,如图12所示。只有一小部分横向或斜向穿越主路。地铁区间隧道和车站大多数位于主路下方,线路一般沿着道路走向布置。因此,大多数管线是与地铁隧道平行走向,小部分与地铁隧道垂直相交,偶尔有斜交管线。

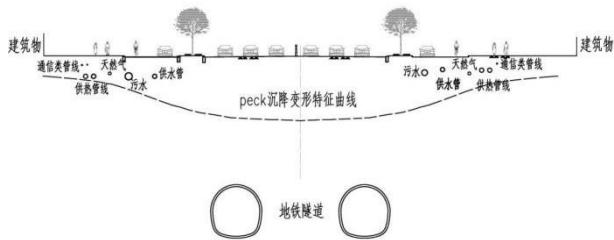


图12 典型地铁区间与管线位置关系图

综合考虑上述雨污水管线破坏形式、地铁隧道的位置关系以及地铁开挖引起的地表变形规律,结合本地区管线渗漏引起塌陷发生的位置,由地铁隧道开挖引起的雨污水管线变形渗漏破坏具有以下规律:

(1) 雨污水管破坏渗漏最可能发生在隧道开挖的垂直方向上,且距离隧道开挖边界约1倍沉降槽宽度附近的管线最有可能发生破坏而渗漏。

(2) 在地铁隧道纵向开挖2倍洞径附近范围内的污水管也较可能产生破坏而渗漏。

5 管线渗漏对浅埋暗挖地铁隧道的影响

针对某地区管线渗漏引发的工程事故案例分析,发现大多数事故发生在正在开挖支护阶段的隧道掌子面部位,即管线渗漏更可能引发隧道掌子面失稳,进而引起地面塌陷。因此,管渗漏的主要危害之一为诱发隧道掌子面失稳。

关于粉黏土地层中浅覆土隧道掌子面失稳机理国内外进行了广泛研究。目前,研究主要针对山岭隧道的掌子面稳定性。在管线渗漏影响下地铁隧道的掌子面稳定性的研究方面较少。城市地铁隧道覆土浅,地表层管线众多,渗漏水及外来水对隧道开挖影响显著。针对某地区的地层特点,采用简化计算的椭球体失稳理论对本文提到的工程事故进行计算分析,并对管线渗漏诱发暗挖地铁隧道安全施工的影响因素进行讨论。

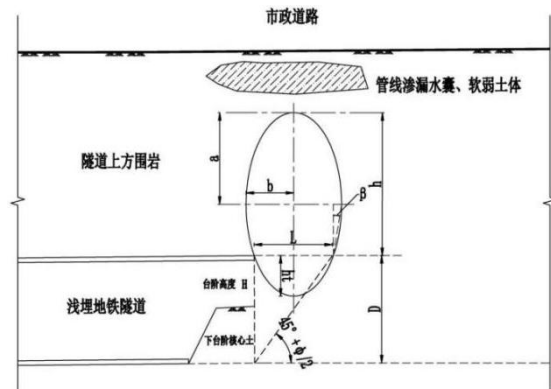


图13 管线渗漏下地铁隧道掌子面椭球失稳模型

基于管线渗漏下掌子面椭球体失稳模型如图13所示,除考虑土体松散土压力外,还需要考虑道路荷载和管线渗漏水形成的水囊等软弱土体荷载。文献^[7-8]给出了当椭球体的轴

比等于侧压力系数 λ 时,塌落拱的高度 $h = \frac{L^2}{4h_t \lambda^2}$,其中

$h_t = L \tan(\theta/2)$ 。根据隧道埋深和塌落拱的高度的关系,

即可判断出隧道能否形成完整的塌落椭球体。

关于掌子面的支护压力,文献^[9]给出了基于椭球塌陷形式的简化计算方法,在考虑地面车辆荷载和水囊等软弱土体荷载情况下,综合考虑超前小导管支护作用,关于地铁隧道的掌子面支护压力 E 可以得到如下公式:

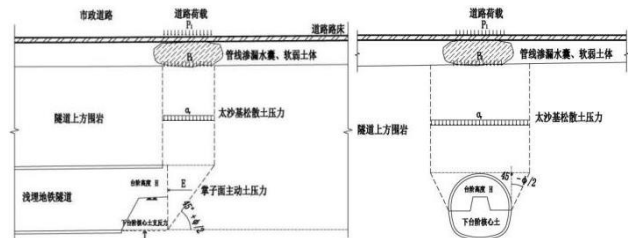


图14 管线渗漏下地铁隧道掌子面稳定性简化计算模型

$$E = -\frac{\xi_1(G_s + G_w) + (2T + K)}{\xi_2},$$

$$\sigma_v = \frac{\gamma a_1 - c}{\lambda \tan \phi} \left(1 - e^{-\frac{\lambda \tan \phi}{a_1} z}\right) + q e^{-\frac{\lambda \tan \phi}{a_1} z}$$

$$\text{其中, } G_s = B(H \cot \theta + l_u - l_z) \sigma_v(Z),$$

$$G_w = \frac{\gamma B H^2 \cot \theta}{2}, K = \frac{B H c}{\sin \theta},$$

$$T = \frac{H^2 \cot \theta (c + k_y \bar{\sigma}_y \tan \phi)}{2},$$

$$\xi_1 = \tan \phi \cos \theta - \sin \theta,$$

$$q = p_1 + p_2 \xi_2 = \tan \phi \sin \theta + \cos \theta, \sigma_v \text{ 为太}$$

$$\text{沙基松散土压力, } \bar{\sigma}_y = \sigma_v(Z_t) + \frac{\gamma H}{3}; a_1 \text{ 为太沙基松散}$$

$$\text{土压力计算宽度, } l_u \text{ 为未支护长度, } l_z \text{ 为超前小导管的有效}$$

$$\text{支护长度, } c \text{ 为初始黏聚力, } \phi \text{ 为初始内摩擦角, } p_1 \text{ 为}$$

$$\text{地面超载, 取为 } 20\text{Kpa}, k_y \text{ 为水平侧应力系数,}$$

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2};$$

根据上述公式,对 M 车站暗挖小导洞掌子面稳定性进行计算分析如下:

表 1 M 车站上层小导洞尺寸及地层物理参数

B/m	H/m	C/Kpa	$\phi/(^\circ)$	埋深 z/m
5.10	4.60	28.00	16.00	12.00
$\gamma / \text{KN} \cdot \text{m}^{-3}$	开挖进尺 lu/m	小导管支护距离 lz/m	侧压力系数 λ	塌落拱高 h/m
19.80	0.50	1.00	0.43	7.83

在不考虑管线渗漏情况下,根据计算分析,导洞拱顶竖向应力 $\sigma_v = 127.53\text{Kpa}$,导洞掌子面支护力 $E_1 = 31.08\text{KN}$,导洞核心土及下台阶土体底面提供摩阻力和粘聚力形成的掌子面支反力 $F_1 = 406.12\text{KN}$,由于 $F_1 > E_1$,且 $F_1/E_1 = 13$,故掌子面稳定。进一步证明采用常规浅埋暗挖法的开挖方式能够满足安全要求。

针对管线渗漏条件下,不同水囊体厚度,粘聚力和内摩擦角降低不同程度,分别计算掌子面的安全稳定性,以评价各个指标的影响程度。计算时,选取其中一个或几个变化因素,其余因素假定不变,计算结果如下图所示:

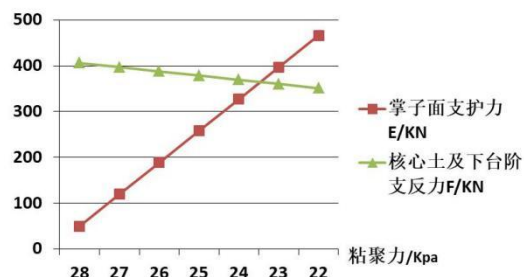


图 15 粘聚力对掌子面稳定性的影响

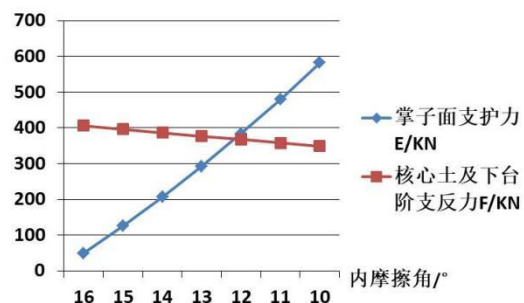


图 16 内摩擦角对掌子面稳定性的影响

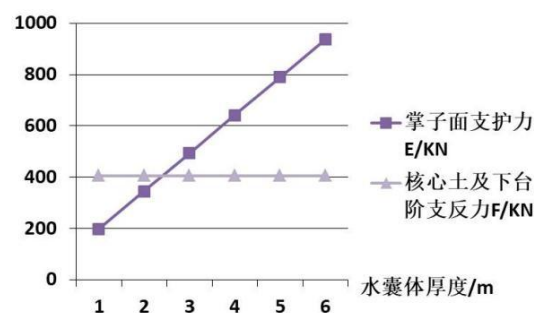


图 17 水囊体厚度对掌子面稳定性的影响

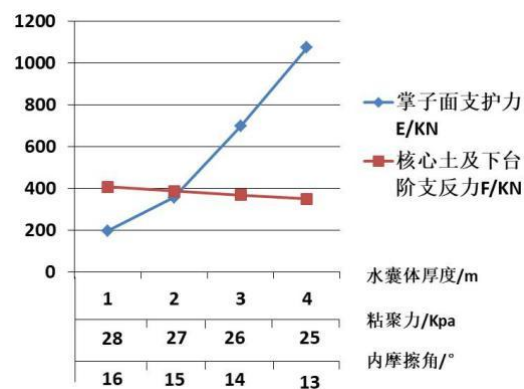


图 18 水囊体厚度、粘聚力及内摩擦角对掌子面稳定性的共同影响

根据上述计算结果图 15 可知,在不考虑管线渗漏形成水囊荷载,且内摩擦角不变条件下,粘聚力降低 5Kpa 时,

即可导致掌子面失稳；根据上述计算结果图 16 可知，在不考虑管线渗漏形成水囊荷载下，且粘聚力不变条件下，内摩擦角降低 4° ，即可导致掌子面失稳；根据上述计算结果图 17 可知，在粘聚力和内摩擦角不变条件下，水囊体厚度达到 2m 厚度，即可导致掌子面失稳；根据上述计算结果图 18 可知，当管线渗漏浸泡下方土体，使得粘聚力和内摩擦角分别降低 2Kpa 和 2° 时，即使水囊体厚度仅为 1m，也能够使得隧道掌子面失稳。

综上计算分析可知，管线渗漏对隧道的掌子面的安全稳定性影响巨大。管线渗漏不仅使得土体力学参数降低，而且也使得管线周边形成水囊等软弱土体，增加掌子面荷载，二者的共同作用下，掌子面容易发生冒顶塌方事故。

另外，根据文献^[3]研究，本地区第四系粉黏土层中存在大量垂直节理，如图 15 所示，随着管线渗漏的持续进行，道路层下方的水囊体会通过垂直节理向下渗漏，当水囊的水压达到一定程度，引起节理裂隙发生管涌或流土时，也会引起掌子面失稳和地面塌陷，这一点也应引起足够重视。

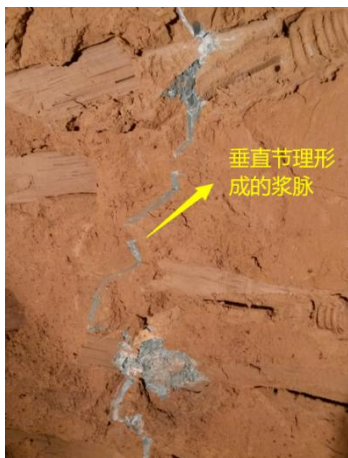


图 19 某地区粉黏土层中的垂直节理

6 防治对策

根据管线渗漏引发塌陷事故的成形机理，建议从治理渗漏和加强地铁隧道开挖支护两个方面着手治理。根据本地区施工经验，管线渗漏引发的安全风险应对措施具体包括以下 6 点：

(1) 地铁施工前，提前进行详尽的管线核查，尤其是地铁隧道两侧 1 倍洞径附近的管线，掌握管线的的使用状态并评估剩余变形能力；

(2) 重点针对直径较大的雨污水管，在地铁施工前提前进行内衬管施工，防止管线进一步渗漏；

(3) 在一些开挖较浅的隧道加强超前支护措施，如超

前小导管或超前管棚，以降低掌子面的竖向土压力荷载，进而增加掌子面稳定，防止塌方冒顶；

(4) 对与隧道上方存在些年久失修的或管线具体资料不详的雨污水管，应考虑采取超前深孔注浆加固隧道上方土体。采用注浆加固土体时，切不可在管线附近盲目进行土体加固，以防止加固浆液填充管线，进一步加剧管线渗漏；

(5) 为增强隧道掌子面的抗变形能力，应严格控制上下台阶的开挖进尺，并注意留足核心土；

(6) 加强管线的监测和洞内支护结构监测指标，采用动态信息指导隧道开挖方案，进一步控制隧道引起的管线变形。

7 结论与讨论

结合某地区覆盖层为第四系粉黏土层这一特点，通过对 M 地铁车站 PBA 小导洞地表塌陷事故和 G 区间地表塌陷事故进行案例分析总结，并对管线渗漏影响下的暗挖车站小导洞采用椭圆塌陷模型进行掌子面稳定计算分析，得到如下研究结论：

(1) 某地区雨污水管渗漏诱发地面塌陷成因主要为：管线自身质量问题及外部荷载作用下，管线发生渗漏。由于道路和粉黏土层的上下隔水作用，使得管线所在土层周边形成水囊。雨季的强降雨会加剧管线渗漏，使得水囊体积迅速增大，在水力作用下冲刷管线周边受浸泡土体，带走大量泥土，而产生地面塌陷。

(2) 依据地铁隧道施工引起的沉降槽曲线变形特征，并结合市政道路管线分布的特点，地铁隧道施工对雨污水管沉降变形的影响主要体现在：①雨污水管破坏渗漏最可能发生在隧道开挖的垂直方向，距离隧道开挖边界约 1 倍沉降槽宽度附近的管线最有可能发生破坏而渗漏；②在地铁隧道纵向开挖约 2 倍洞径附近的污水管也较可能破坏而渗漏。

(3) 通过采用简化计算的椭圆塌陷模型对暗挖车站小导洞掌子面进行稳定计算分析，可知管线渗漏对地铁隧道掌子面的安全稳定性影响巨大。管线渗漏一方面使得路面下形成水囊等软弱土体，增加了隧道外部荷载。另一方面，使得降水后的地层含水量增加，土体力学性质下降，降低了围岩的承载能力，从而引起掌子面失稳，进而引起地面塌陷。此外，由于某地区粉黏土层存在垂直节理裂隙，管线渗漏使得节理裂隙发生管涌或流土时，也容易引起地面塌陷和掌子面失稳。

(4) 根据管线渗漏引发塌陷事故的成形机理，建议从治理渗漏和加强地铁隧道开挖支护两个方面着手进行综合

治理。

下一步研究可在管线渗漏引起的地层具体参数变化方

面进行,也可以考虑研究垂直节理裂隙对掌子面渗漏稳定性的影响,以为治理管线渗漏引发的工程事故提供进一步技术参考。

参考文献:

- [1] Options for leak and break detection and repair of drinking water systems[J].2000.
- [2] National coal board mining department. Subsidence engineer's handbook, 1975.
- [3] 蔡可易,王清.长春地区黄土状土工程地质研究.[A].第三届全国岩土与工程学术大会论文集,2009.
- [4] 苏秀杰,宫成云等.长春市城区岩土工程地质浅析[J].吉林地质,2008,27(3).
- [5] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [A]. Proc. 7th Int. Conf. SMFE. Mexico City. State of the Arts Volume[C]. 1969. 225—290.
- [6] 姚宣德,王梦恕.地铁浅埋暗挖法施工引起的地表沉降控制标准的统计分析[J].岩石力学与工程学报 2006,25(10):2031.
- [7] 杜俊.软弱围岩隧道掌子面失稳机理与控制对策研究[D].博士论文,中国铁道科学研究院,2017.
- [8] 杜俊,梅志荣,陈永照.基于椭球体失稳坍塌理论的隧道掌子面失稳计算研究[J].隧道建设,2018,38(9):1501.
- [9] 顾博渊,白浪峰等.隧道掌子面稳定性分析的一种简化方法[J].筑路机械与施工机械化 2019,36(12):130-132.