

砂卵石地层圆形隧道施工引起的土体移动特征^{*}

范建国^{1,2}, 方勇¹, 张雪金¹, 杨志浩¹

(1.西南交通大学 交通隧道工程教育部重点实验室,成都 610031;2.北京城建设计发展集团
股份有限公司,北京 100045)

摘 要:采用室内模型试验研究了不同地层损失率下的地表沉降及地中位移分布,揭示了砂卵石地层圆形隧道施工地层损失引起的土体移动特性及传播机制。试验结果表明:不同地层损失下地表沉降槽同样具有高斯分布函数形态特征,距隧道中心线 $1D$ 范围为地层沉降的主要区域,该区域沉降受地层损失的影响最大;水平位移量值较大,最大水平位移出现在隧道左侧拱肩斜向上至地表的区域;地层颗粒的移动方向总体指向地层损失产生区域,同时受地层损失的大小、形态及分布特征等因素的影响;地表及地中沉降槽宽度系数随地层损失率的增大而缓慢增大。研究表明,不同地层损失下土体的松动、塌落及重新固结是砂卵石地层位移的主要原因,由于地层损失导致砂卵石地层物性参数的改变和颗粒在水平方向的移动和填充作用,使得地表及地中沉降槽宽度系数随地层损失率的增大而改变。

关键词: 砂卵石地层;盾构隧道;地层损失;模型试验;地层移动

中图分类号:U121

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2017)06-1599-09

Ground Movement Induced by Shield Tunnel Construction in Sandy Cobble Stratum

Fan Jianguo^{1,2}, Fang Yong¹, Zhang Xuejin¹, Yang Zhihao¹

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P.R. China; 2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co.Ltd., Beijing 100045, P.R. China)

Abstract: The surface subsidence and ground displacement distribution at different ground loss ratios were studied by indoor model tests. The ground movement characteristics and transmission mechanisms induced by shield tunnel construction ground loss in sandy cobble stratum were revealed. The experimental results show that subsidence trough has the similar profile as Gaussian distribution function. The main area of ground subsidence, where the subsidence is influenced by ground loss, is located within the range of $1D$ distance to tunnel central line. Horizontal displacement is large and the maximum horizontal displacement occurs on the left side of the tunnel spandrel to the surface. Ground particles move toward the area where ground loss happens and it is influenced by degree form and distribution character of ground loss. The subsidence trough width coefficients on the surface and in the ground increase gently with the increasing of ground loss ratio. It was revealed that the loosening, caving and reconsolidation of the soil are the main reasons of ground movement in case of ground loss. The change of physical parameters caused by ground loss in sandy cobble stratum and the actions of horizontal movement and filling causes that the subsidence trough width coefficient gently increases with the ground loss ratio.

Keywords: sandy cobble stratum; shield tunnel; ground loss; model test; ground movement

^{*} 收稿日期:2017-06-08(修改稿)

作者简介:范建国(1990-),男,河北张家口人,硕士生,主要从事隧道及地下工程方面的研究。E-mail:529192457@qq.com

通讯作者:方勇(1981-),男,博士,四川大竹人,教授,硕士生导师,主要从事隧道施工力学行为等方面的教学与科研工作。E-mail:fy980220@swjtu.cn

基金项目:国家自然科学基金(51278422);国家科技支撑计划课题(2012BAG05B03);中央高校基本科研业务费专项资金(SWJTU11ZT33)

0 引言

盾构工法作为城市地铁区间隧道以及油气管道修建的主流方法,其应用范围覆盖了从黏土、粉土到砂卵石等不同类型的地层。盾构工法引起的地层移动一直是城市地铁和油气管道建设重点关注的问题,许多学者对此问题进行了一系列的研究,认为盾构施工引起的地层体积损失是产生地层移动的主要因素^[1],并基于地层体积损失,提出了一系列的经验公式。Peck^[2]在对当时大量由于隧道开挖而引起地表沉降的实测资料基础之上,提出了地层损失的概念和估算地表沉降的经验公式,随后 O'Reilly^[3]、Attewell 等^[4]和 Mair 等^[5]在实测资料的基础上,提出了适用于粘土及砂土等地层的沉降槽宽度系数 i 的计算公式。Bolton 等^[6]、Nomoto 等^[7]及 Loganathan 等^[8]将离心试验用于研究盾构隧道开挖引起的地表移动,Marshall 等^[9]则采用离心试验研究了砂土地层中隧道尺寸、埋深及地层损失对地表沉降的影响,结果表明,地层损失引起的地表沉降槽形态与高斯分布曲线较为接近。相对于离心试验,1g 下的室内模型试验具有更大的几何尺度,也被大量用于盾构掘进的研究中^[10-12]。在砂土地层地表沉降规律方面,代表性的研究包括:何川等^[13]开展了模型盾构机室内掘进试验,获得了砂土地层下的盾构掘进引起的地表沉降规律;王正兴等^[14]分析了不同深度的沉降规律及地层损失量变化特征,并揭示了砂性地层沉降槽宽度系数与土层埋深之间存在较好的线性关系。

国内软土地层盾构施工地表沉降的实测数据分析表明,正常情况下地层损失率约为 0.20%~3.01%^[15],该地层损失引起的地表沉降在允许范围之内。但在砂卵石地层中,由于骨架颗粒之间的空隙大、黏聚力低,对外界扰动较为敏感,若施工控制不当,地层原来的稳定状态很容易遭到破坏而产生坍塌,引起比正常情况要大很多的地层损失,传至地表则引起大范围的地表沉降,或局部坍塌形成大坑。砂卵石地层损失带来的环境问题在成都地铁一号线施工中经常发生,给沿线交通及建筑物带来严重的负面影响^[16-17]。砂卵石地层损失情况下,地层移动的特征与一般软土情况有所差异,尤其是水平移动变得更为明显。本文采用物理试验的方法研究砂卵石地层圆形隧道施工在不同地层损失率下的地层移动规律,揭示地层损失率与地面沉降

槽形态特征、沉降槽宽度系数、水平位移特征等相关关系。

1 试验方案

1.1 地层损失分布形态

地层损失的分布形态主要有两种假定:均匀分布和卵形分布。Sagaseta^[18]、Verruijt 等^[19]认为圆形隧道开挖后,地层损失沿径向均匀分布,地表沉降及地中位移可以采用径向均匀分布的移动模式获得。Row 等^[20]及 Loganathan 等^[21]认为由于管片衬砌的下沉、掘削面土体的三维弹塑性移动以及施工影响等因素,盾构机周围的地层损失实际上具有卵形分布形态,如图 1 所示。

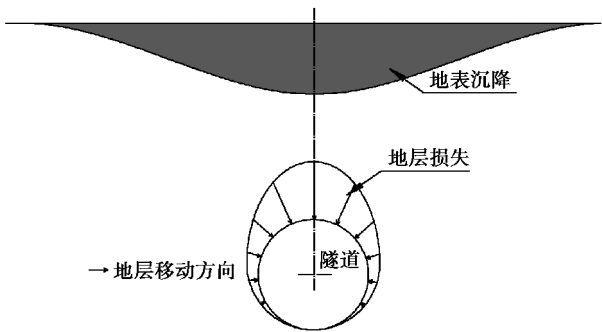


图 1 地层损失形态
Fig.1 Distribution of ground loss

1.2 试验台架

利用对称性原理设计制造了盾构隧道施工地层损失模拟试验台架,如图 2 所示。试验台架采用钢化玻璃制作,边缘用角钢连接,几何尺寸为 1 200 mm(高)×1 100 mm(宽)×300 mm(厚)。将直径为 300 mm 刚性半圆柱体固定于台架上,用于模拟圆形隧道结构边界,隧道埋深为 2D(D 为隧道外径),隧道中心距地表距离为 75cm。同时在台架正面横向和纵向上按 100 mm 间距设置刻度线,在刻度线围成的 100 mm×100 mm 正方形区域内贴近观察面埋设标识球,通过记录标识球的移动来获得地层移动分布规律。

根据地层损失形态假定,按照地层损失率为 10%、20%、40%、和 60%这 4 种工况,分别制造了不同体积和轮廓的地层损失模拟盒。试验填土前,在地层损失模拟盒上紧贴一层塑料薄膜,塑料薄膜上涂抹一层稀薄的润滑油,在润滑油上再覆盖一层塑料薄膜,以减小地层损失模拟盒抽出过程中由于摩擦而造成的影响。在填土过程中,将土体分层装填,每隔 10 cm 放置标识球,方便以后土体位移的

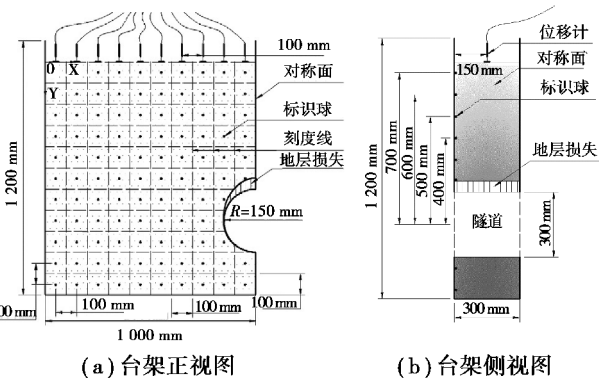


图2 模型试验台架
Fig.2 Model testing box

测量。土体填充完毕后,静置以使土体达到稳定。试验过程中,将该模拟盒缓慢地沿着顺时针方向抽出,以减少由于摩擦以及其他外界因素而引起误差,试验结束静置到土体稳定后再进行土体位移的测量,用模拟盒的转动以及土体的移动模拟地层损失的全部过程。

同时,为了减小偶然误差对试验结果的影响,每种工况进行3次试验,取其平均值作为试验结果,共进行4×3=12次试验。

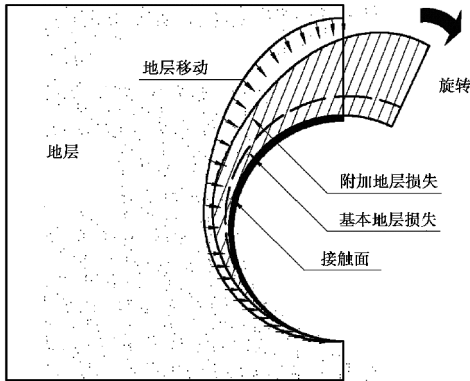


图3 地层损失的模拟
Fig.3 Simulation of ground loss

1.3 土样配置

模型试验对砂卵石土体采用相似理论配制后,无法避免改变模型的约束条件,且土体之间无法实现相似的物理作用改变剧烈;离心机模拟验虽采用原状土,但模型的大比例缩小对约束条件的改变也是不可忽略的。本实验采用原状砂卵石土体研究砂卵石地层圆形隧道施工引起的土体移动特征,试验模型缩小比例小,不仅可以避免模型试验中土样配制带来的问题,同时也避免离心机试验模型大比例缩小带来的影响。

试验土样取自成都地铁二号线成灌客运站施工现场第四系全新统冲积层(Q_4^{al})卵石土地层(<2-6-1>),该地层的物性参数如表1所示。

表1 卵石土天然物性参数
Table 1 Natural material parameters

密度 /($g \cdot cm^{-3}$)	压缩模量 /MPa	侧压力 系数	粘聚力 /kPa	摩擦角 /($^{\circ}$)	含水率 /%
1.9	25.0	0.30	0.5	30	8

试验中固定试验台架并安置地层损失模拟盒后,将卵石土体按10 cm一层在台架中装填并夯实,然后在水平方向以10 cm间距放置一排标识球,且各标识球紧贴试验箱,以尽量减少后续测量所引起的误差。

表2 土样级配
Table 2 Grain size composition

粒径/mm	0~2	2~10	10~20	>20
质量百分比/%	12.14	27.64	53.88	6.34

1.4 位移量测

本次试验记录的地层移动包括地表沉降和地中位移。地表沉降采用差动式数显位移计测量,精度为0.01 mm,共10个测点,测点间距为10 cm,位移计探头布设于隧道轴向的中间断面上,如图2所示,布设完成的地表位移探头如图4所示。



图4 地表沉降测量
Fig.4 Surface settlement measurement

地中位移通过测量标识球的移动获得,测量方法有两种,一种采用传统的游标卡尺测距,另一种为照相测量^[22]。前者测量工作量大、精度较高(0.05 mm),但测量点数较少,主要用于初始状态和最终状态的坐标测量;后者可获得试验过程中地层位移场的分布情况,但精度受相机像素影响。试验前记录下各标识球的初始坐标,模拟地层损失产

生后,待试验箱中卵石土位移基本达到稳定,记录各标识球的最终坐标。根据标识球坐标的变化,可得到大地层损失产生后各标识点的位移矢量。

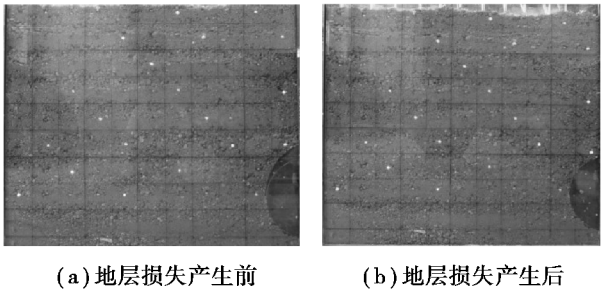


图 5 地中位移标识球
Fig.5 Marking particle in test ground

2 试验结果分析

2.1 地表沉降

不同地层损失下地表沉降曲线如图 6 所示。可以看出,砂卵石地层地表沉降曲线总体形态特征与 Peck 假定的高斯分布曲线类似,不同地层损失率所引起地表沉降形态也基本相同,隧道上方的地表沉降量最大,在隧道两侧地表沉降逐渐减小。随地层损失率的增加,最大地表沉降显著增加,当地层损失率为 10%、20%、40%、60%时,对应的最大地表沉降依次为 15.56 mm、19.41 mm、39.35 mm、45.54 mm。地层损失增加也引起地表沉降槽宽度增大,但增加幅度相对较小。地表两侧在距隧道中心约 2.5D(D 为隧道外径)后,地表沉降不再明显,且基本不受地层损失率的影响。

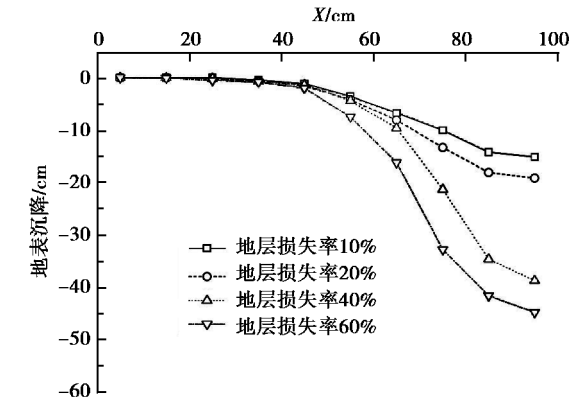


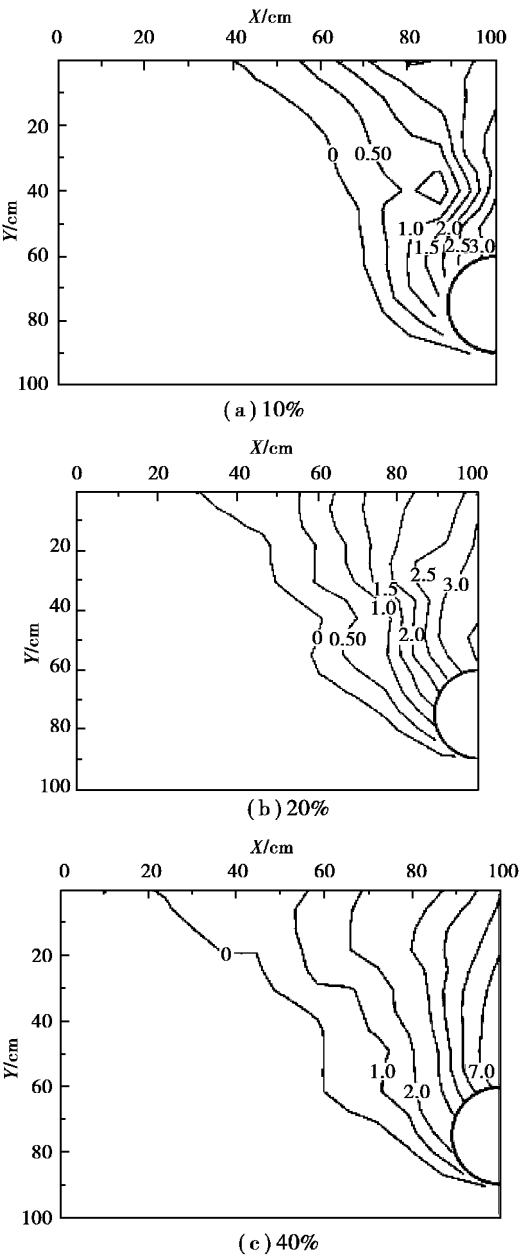
图 6 地表沉降曲线
Fig.6 Surface settlement curves

2.2 地中位移分布

2.2.1 地层沉降

不同地层损失下地中沉降等值线如图 7 所示。

可以看出,隧道上方为地层沉降产生的主要区域,其范围为隧道中心线两侧 1D 范围之内。在同一水平线上,隧道中线上方地层沉降最大,向两侧逐渐减少,基本趋势与地表沉降分布规律一致。随着地层损失率的增加,沉降的范围向两侧有所扩大,沉降量值的增加主要发生在沉降主区域内。最大地中沉降位于隧道拱顶处,除了与地层损失率有关外,也与地层损失的分布形态有关,在向地表传播过程中逐渐减小。在试验中假定的抛物线形分布情况下,当地层损失率分别为 10%、20%、40%、60%时,最大地中沉降分别为 27 mm、33mm、75 mm、130 mm。可以看出,最大地中沉降与地层损失率之间仍然存在较强的线性相关关系。



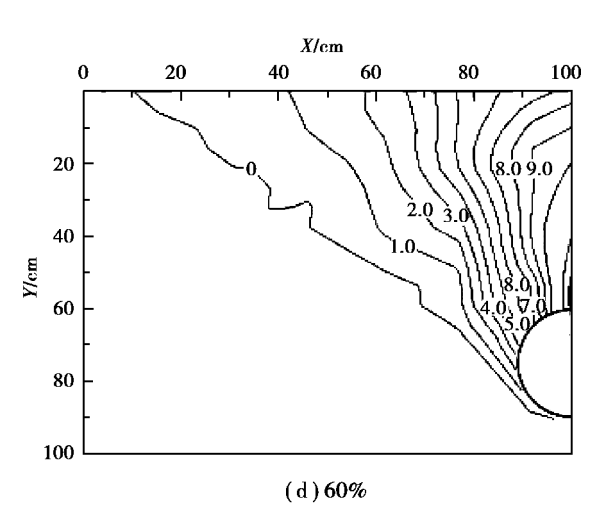


图 7 不同地层损失率时地中沉降

Fig.7 Ground settlement at different ground loss ratio

2.2.2 地层水平位移

本次试验基于对称性原理开展,故在对称面(隧道中线上方)上地层水平位移为 0。地中水平位移主要发生在隧道左侧拱肩斜向上至地表的区域,故在同一水平线上,地层水平位移随着与隧道中线距离的增加呈现先增加后减小的趋势。当地层损失逐渐增大时,地层水平位移的量值逐渐增大,且分布范围在左侧有所扩大,但水平移动主区域的大小和位置并未显著改变。最大地层水平位移发生在距隧道中线约 1D 的近地表处,当地层损失率分别为 10%、20%、40%、60%时,最大地中水平位移分别为 9 mm、12 mm、15 mm、31 mm。可见,当地层损失率过大时,水平位移在量值上同样有较大幅度的增加。考虑到地层损失下砂卵石颗粒的移动不连续性,地层变形不再是颗粒水平移动的唯一因素,故其水平位移已不可忽略。

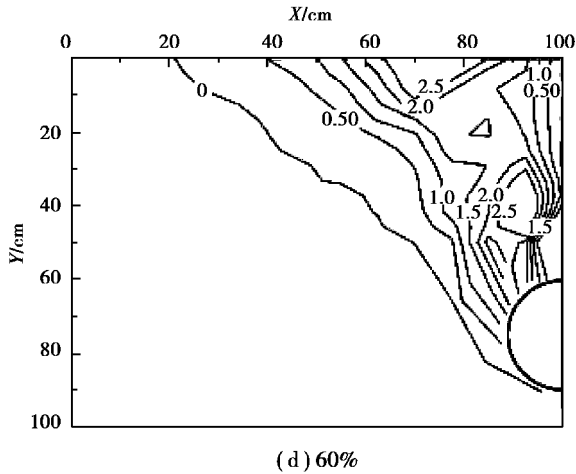
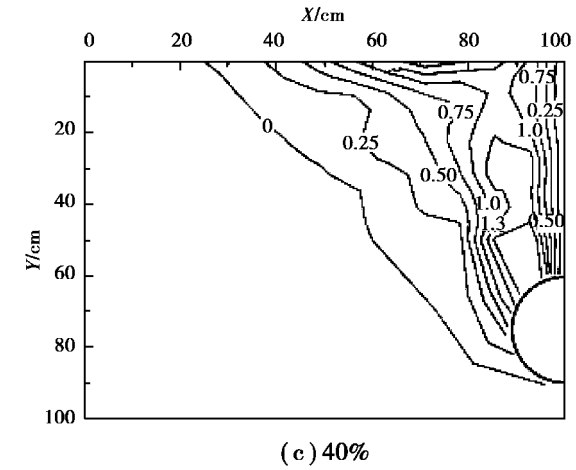
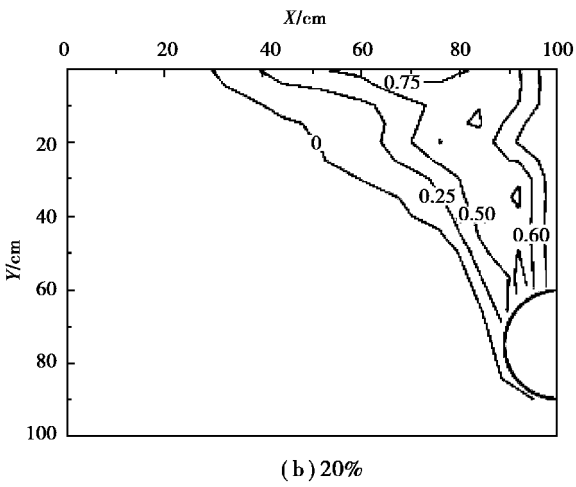
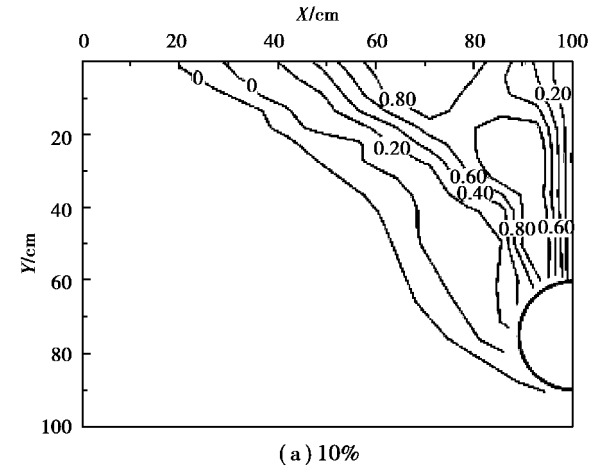


图 8 不同地层损失率时水平位移

Fig.8 Horizontal displacement at different ground loss ratio

2.2.3 地层位移大小及方向

绘制不同地层损失率下地层位移大小的等值线如图 9 所示。该图与地层沉降等值线图类似,表明地层最大位移(标量)产生于隧道上方,随着地层损失率的增加,地层位移的范围和量值都显著增加,当地层损失率分别为 10%、20%、40%、60%时,最大地层位移分别为 33 mm、36 mm、75 mm、130 mm。

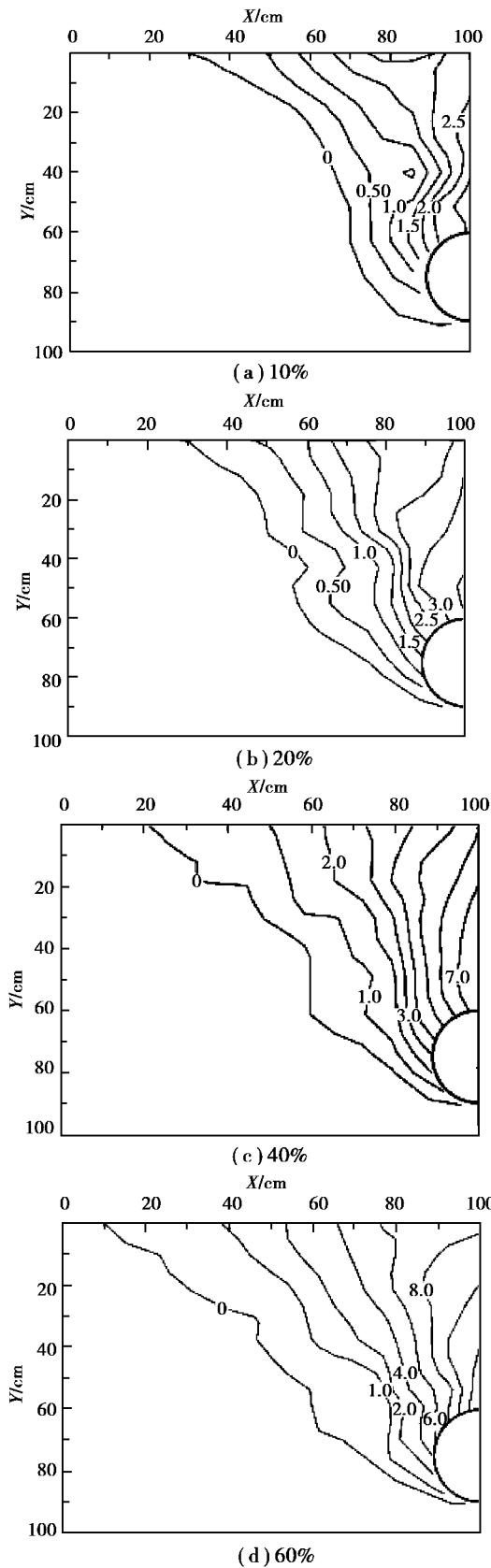
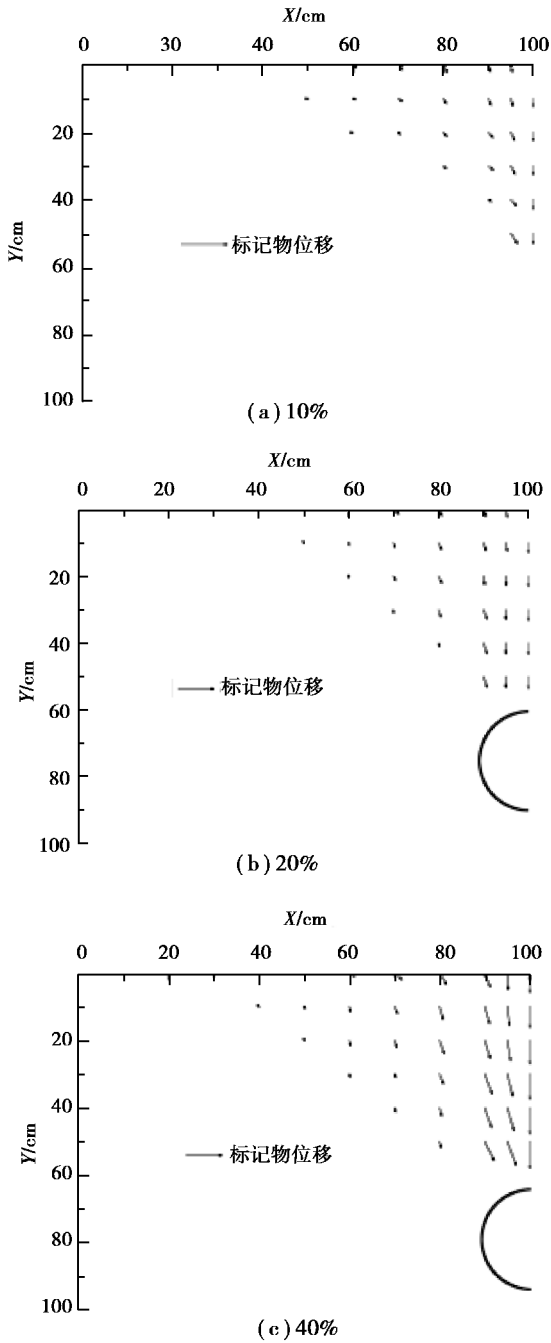


图 9 不同地层损失率下地层位移分布 (标量)

Fig.9 Ground movement distribution at different cases (scalar)

不同地层损失率下地中测点的位移向量如图 10 所示。从沉降范围上看,在隧道上方距中心线 1D 范围内为地层位移的主要区域,该区域地层位移的量值主要受地层损失影响,两者之间存在线性相关关系。该区域外的地层移动范围会随着地层损失的增大而扩大,但量值上受地层损失率的影响相对较低。同时也可以看出,土体移动方向均指向地层损失产生区域。故除地层损失大小外,其形态及分布特征也影响着地层颗粒移动的方向。



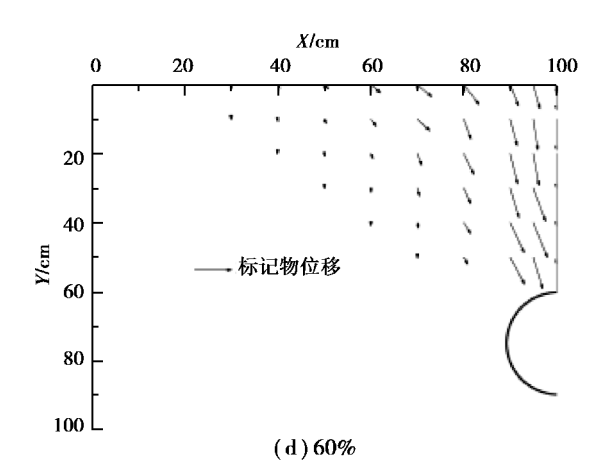


图 10 不同地层损失率下地层位移分布(向量)

Fig.10 Ground movement distribution at different cases (vector)

2.3 沉降槽宽度系数

2.3.1 地表沉降槽宽度系数

地表沉降槽宽度系数*i*通常被定义为沉降槽曲线反弯点至隧道中线的水平距离,它体现了沉降槽曲线的陡缓程度。目前的研究表明,该宽度系数*i*主要受地层条件、隧道半径及埋置深度等因素的影响。砂性土地层中地表沉降槽宽度系数代表性计算公式如表 3 所示,将本试验中模型隧道的埋深、几何尺寸及土样的物性参数代入可以计算出相应的沉降槽宽度系数估算值。这些公式并未考虑地层损失的影响,故在不同地层损失率的沉降槽宽度系数为一常量。从量值上看,Peck 公式计算出的沉降槽宽度系数较大,O’ Reilly 公式给出的计算结果较小,而 Atkinson 的公式计算则介于两者之间。

表 3 地表沉降槽宽度系数

估算公式		地层损失率 η /%			
		10	20	40	60
O’ Reilly ^[3]	$i = 0.28z_0 - 0.1$		0.11		
Atkinson ^[23]	$i = 0.25(z_0 + R)$		0.225		
Peck ^[2]	$i = (H + R) / 2.5 \tan(45^\circ - \varphi / 2)$		0.498		
高斯函数拟合	$S_{(x)} = S_{\max} e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$	0.245	0.254	0.257	0.266

注:其中 z_0 为隧道中心距地表距离, R 为隧道半径, φ 为地层内摩擦角, $S_{(x)}$ 为 x 位置地表沉降, S_{\max} 为地表最大沉降

Peck 等提出的地表沉降槽估算公式本质上为高斯函数。采用高斯函数对不同地层损失率下的地表沉降进行拟合,可以获得不同地层损失率对应的沉降槽宽度系数,如表 3 所示。可以看出,通过数据拟合获得的沉降槽宽度系数与 Atkinson 公式给出的估算值较为接近,明显小于 Peck 公式估算值,也大于 O’ Reilly 公式估算值。故目前多用于砂性地层地表沉降槽宽度系数的估算公式对砂卵石地层损失下的沉降槽宽度系数估算适用性较差。

对地表沉降试验数据的高斯函数拟合结果同时也表明,随着地层损失率的增加,沉降槽宽度系数也缓慢增加。对不同地层损失率下的沉降槽宽度系数进行线性拟合,结果如图 11 所示。可以看

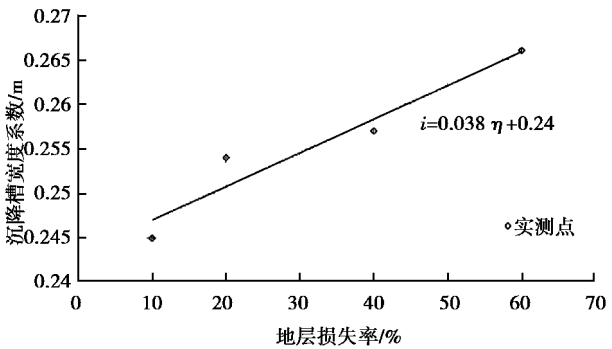


图 11 地层损失率与地表沉降槽宽度系数关系

Fig.11 Relationship between ground loss ratio and trough width coefficient on the surface

出,两者之间呈现较好的线性关系:

$$i = 0.038\eta + 0.241 \tag{1}$$

相对于地表沉降而言,随着地层损失率的增加,沉降槽宽度系数的增加幅度要小很多,故在正常地层损失水平下,地表沉降槽宽度系数可以认为是一常量。

2.2.2 地中沉降槽宽度系数

同样采用高斯分布对不同深度下地中沉降进行数据拟合,可以获得不同地层损失率下的地中沉降槽宽度系数,如表 4 所示。可以看出,在相同地层损失情况下,离隧道拱顶越远(即离地表越近),地中沉降槽宽度系数越大,沉降槽越缓;反之离隧道拱顶越近,地中沉降槽宽度系数越小,沉降槽越陡。两者之间存在较好的线性关系,这与目前沉降槽宽度系数的预测一致。

表 4 地中沉降槽宽度系数

Table 4 Trough width coefficient in the ground

离拱顶 距离/cm	地层损失率 η /%			
	10	20	40	60
25	0.096	0.121	0.147	0.157
35	0.151	0.175	0.196	0.202
45	0.182	0.201	0.216	0.223
55	0.215	0.225	0.231	0.243

表 4 同时也表明,当深度相同时,地层损失越大,地中沉降槽宽度系数也越大,而且与地表沉降相同,随着地层损失的成倍增加,地中沉降槽宽度系数增加较为缓慢。地层损失率与地中沉降槽宽度系数的相关性回归分析表明,两者之间存在一定的线性相关性。当地层距隧道拱顶 1D 时,回归直线斜率为 0.101,当地层距隧道拱顶 2D 时,回归直线斜率为 0.051,即地层越深(越接近隧道),回归直线斜率越大,沉降槽宽度系数受地层损失大小的影响越显著,如图 12 所示。

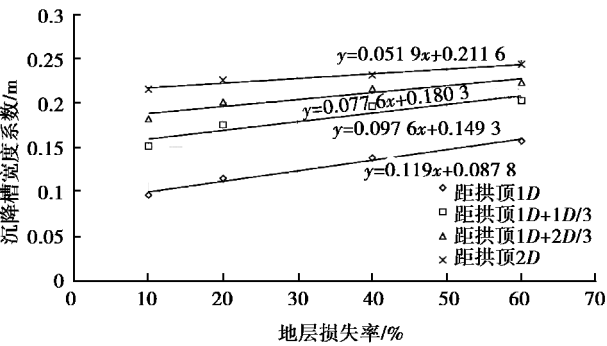


图 12 地层损失率与地中沉降槽宽度系数的关系
Fig.12 Relationship between ground loss ratio and trough width coefficient under the ground

2.3.3 地层移动的传播机制

地表及地中沉降槽宽度系数与地层损失率的相关关系表明,砂卵石圆形隧道地层损失率下颗粒的移动传播机制主要有两个方面。首先,砂卵石地层损失下的地层移动是一个不连续的过程,当较大的地层损失产生时,上部地层开始松动、塌落,塌落后的砂卵石颗粒在隧道上方重新固结,这种不连续的地层移动逐渐向上传播至地表,引起地表沉降。松动、塌落后的地层颗粒在物性参数上与原地层存在差异,导致了沉降槽宽度系数的改变。随着地层损失的增加,上方地层松动、塌落的范围也增大,从而使得地表沉降槽宽度系数也随着地层损失的增

加而变化。其次,地层损失率超出允许范围后,地层的水平移动不可忽略。地层损失产生后,砂卵石颗粒在水平方向的移动和填充作用使得地表沉降向两侧的扩散范围更大,从而促使沉降槽宽度系数的增大。

3 结论

通过开展室内模型试验,揭示了砂卵石地层下不同地层损失引起的地层移动特性,获得了不同地层损失率下的地表沉降及地中位移分布,得到如下结论:

(1)砂卵石地层下地层的损失是造成地层位移的主要原因,但不是唯一原因。砂卵石颗粒的移动是一个不连续的过程,首先是上部地层的松动和塌落,其次为塌落后的地层颗粒在隧道上方的重新固结,这种不连续的地层移动逐渐向上传播至地表,引起地表沉降,故上部地层的松动塌落后地层颗粒的重新固结也是地表沉降的重要原因。

(2)砂卵石地层损失情况下,隧道上方的主沉降区域沉降量值随地层损失率的增加而显著增大;地层水平位移量值较大,不可忽略,最大水平位移位于隧道左侧拱肩斜向上至地表的区域;地层颗粒的移动方向总体指向地层损失产生区域,但受地层损失的大小、形态及分布特征等因素的影响。

(3)地表及地中沉降槽宽度系数随地层损失率的增大而缓慢增大,主要有两方面原因:一是砂卵石地层松动、塌落、重新固结后的地层物性参数发生改变;二是地层损失产生后,砂卵石颗粒在水平方向的移动和填充作用使得地表沉降向两侧的扩散范围更大。

参考文献(References)

[1] 刘建行,候学渊. 盾构法隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1991. (Liu Jianghang, Hou Xueyuan. Shield tunneling method [M]. BeiJing: China Railway Publishing House, 1991. (in Chinese))

[2] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground [A] // Proceedings of 17th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. Mexico City, 1969:225-290.

[3] O'Reilly M P, New B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction [A]// Proceedings of the third international sympo-

- sium, tunnelling 82 [C]. London: Institution of Mining & Metallurgy, 1982:173-181.
- [4] Attewell P B, Hurrell M R. Settlement development caused by tunneling in soil [J]. Ground Engineering, 1985, 18(8): 17-20.
- [5] Mair R J, Taylor R N, Bracegirdle A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays [J]. Géotechnique, 1993, 43(2): 315-320.
- [6] Bolton M D, Lu Y C, Sharma J S. Centrifuge models of tunnel construction and compensation grouting. Proc., Int. Symp. on Geotech [A] // Aspects of underground constr. in soft ground [C]. Rotterdam, 1996:471-476.
- [7] Nomoto T, Imamura S, Hagiwara T, et al. Shield tunnel construction in centrifuge [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(4): 289-300.
- [8] Loganathan N, Poulos H G, Stewart D P. Centrifuge model testing of tunneling-induced ground and pile deformations [J]. Géotechnique, 2000, 50(3): 283-294.
- [9] Marshall A M, Farrell R, Klar A, et al. Tunnels in sands: the effect of size, depth and volume loss on greenfield displacements [J]. Géotechnique, 2012, 62(5): 385-399.
- [10] Kim S H. Interaction between closely spaced tunnels in clay [A] // Proceedings of international symposium on geotechnical aspects of underground construction in soft ground [C]. London: Balkema, 1996:543-548.
- [11] 朱中华,徐前卫,廖少明,等. 土压平衡盾构法施工参数的模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 553-557. (Zhu Hehua, Xu Qianwei, Liao Shaoming, et al. Experimental study on working parameters of EPB shield machine [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 553-557. (in Chinese))
- [12] Chapman D N, Ahn S K, Hunt D V L. Investigating ground movements caused by the construction of multiple tunnels in soft ground using laboratory model tests [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(6): 631-643.
- [13] 何川,汪洋,方勇,等. 土压平衡式盾构掘进过程的相似模型试验 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(2): 162-169. (He Chuan, Wang Yang, Fang Yong. Similarity model test of earth-pressure-balanced shield tunneling [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(2): 162-169. (in Chinese))
- [14] 王正兴,缪林昌,王冉冉,等. 砂土中隧道施工引起土体内部沉降规律特征的室内模型试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 05: 133-139. (Wang Zhengxing, Miao Linchang, Wang Ranran, et al. Physical model study on subsurface settlement by tunneling in sand [J]. China Civil Engineering, 2014, 05: 133-139. (in Chinese))
- [15] 魏纲. 盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究 [J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1354-1361. (Wei Gang. Selection and distribution of ground loss ratio induced by shield tunnel construction [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1354-1361. (in Chinese))
- [16] 滕丽,张恒. 盾构穿越砂卵石地层地表沉降特征细宏观分析 [J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1141-1150. (Teng Li, Zhang Heng. Meso-macro analysis of surface settlement characteristics during shield tunneling in sandy cobble ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1141-1150 (in Chinese))
- [17] 罗松,张浩然. 成都富水砂卵石地层盾构施工滞后沉降防控措施探讨 [J]. 隧道建设, 2010, 30(3): 317-319+335. (Luo Song, Zhang Haoran. 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): 317-319+335. (in Chinese))
- [18] Sagaseta C. Analysis of undrained soil deformation due to ground loss [J]. Geotechnique, 1987, 37(3): 301-320.
- [19] Verruijt A, Booker J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane [J]. Geotechnique, 1996, 46(4): 753-756.
- [20] Rowe R K, Lee K M. An evaluation of simplified techniques for estimating three-dimensional undrained ground movements due to tunnelling in soft soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29: 39-52.
- [21] Loganathan N, Poulos H G. Analytical prediction for tunneling induced ground movements in clays [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, ASCE 124(9): 846-856.
- [22] 宋锦虎,缪林昌,胡斌,等. 地下水对盾构开挖面上方土拱效应影响的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2014, 47(2): 109-120. (Song Jinhu, Miao Linchang, Hu Bin, et al. Experimental study on influence of ground water on the soil arching above the tunnelling face [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(2): 109-120. (in Chinese))
- [23] Atkinson J H, Potts D M. Subsidence above shallow tunnels in soft ground [J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1977, 103(4): 307-325.