

DOI: 10.11779/CJGE201905018

地表超载对软、硬地层中既有盾构隧道影响的试验研究

黄大维¹, 周顺华², 冯青松^{*1}, 李雪³, 封坤⁴, 黄强⁵

(1. 华东交通大学铁路环境振动与噪声教育部工程研究中心, 江西 南昌 330013; 2. 同济大学上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804; 3. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500; 4. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 5. 宁波大学岩土工程研究所, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为了探明地表超载对软、硬地层中既有盾构隧道的影响, 通过隧道与地层相互作用的模型试验, 对地表超载作用下隧道变形、土压力及土体沉降进行了量测。试验结果分析表明, 相同的地表超载作用下, 软土地层中的隧道横椭圆变形要大于硬土地层中的隧道横椭圆变形。当隧道穿越土层的土体压缩模量较小时, 地表超载作用下隧道上覆土层表现为被动土拱土压力; 当隧道穿越土层的土体压缩模量较大时则为主动土拱土压力。隧道竖向收敛变形与其穿越土层竖向压缩量之间的关系分析表明, 隧道横断面变形刚度与穿越土层的土体压缩模量共同决定隧道上覆土层的沉降状态, 从而决定了地表超载对既有盾构隧道的影响。研究成果定性地揭示了软土地区既有盾构隧道在地表超载作用下极易发生变形超限的机理。

关键词: 地表超载; 盾构隧道; 土拱; 土压力; 收敛变形

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)05-0942-08

作者简介: 黄大维(1984—), 男, 湖南郴州人, 博士, 讲师, 主要从事地下铁道与岩土工程相关研究。E-mail: 1110604@tongji.edu.cn。

Experimental study on influences of surface surcharge on existing shield tunnels buried in soft and hard soils

HUANG Da-wei¹, ZHOU Shun-hua², FENG Qing-song¹, LI Xue³, FENG Kun⁴, HUANG Qiang⁵

(1. Engineering Research Center of Railway Environmental Vibration and Noise, Ministry of Education, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 4. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 5. Institute of Geotechnical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: To explore the influences of surface surcharge on the existing shield tunnels buried in soft and hard soil strata, the scaled model tests on the interaction between shield tunnels and strata are carried out, and the tunnel deformation, earth pressure and soil settlement under surface surcharge are measured. Analysis of model test results shows that under the same surface surcharge, larger deformation is induced for the tunnel buried in soft soils than in hard soils. As the compression modulus of the soil strata is small, the overlaying soils over the tunnel exhibit passive earth arch pressure under surface surcharge. Under the large compression modulus of the soil strata, the overlaying soils over the tunnel show active earth arch pressure. The relation between the vertical convergence deformation of the tunnel and the vertical compression of the soil strata indicates that both the stiffness of cross section of shield tunnel and the compression modulus of soil strata determine the settlement state of the overlaying soils over the tunnel, and thus decide the influences of surface surcharge on the existing shield tunnels. The research results qualitatively reveal the reason of the mechanism why the oversized deformation is easily induced for the existing shield tunnels under surface surcharge.

Key words: surface surcharge; shield tunnel; soil arch; earth pressure; convergence deformation

0 引言

软土地层中的盾构隧道在运营期地表超载作用下极易发生横椭圆变形过大, 同时诱发管片纵缝接头张

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608200, 51478353, 51368020)

收稿日期: 2018-12-11

*通讯作者(E-mail: fqshdjtdx@aliyun.com)

开而螺栓外露, 管片棱角开裂、破损, 严重时隧道发生渗漏水, 严重威胁地铁的运营安全^[1-6]。如上海地铁多个区间盾构隧道在现有计算理论所允许的地表超载作用下发生了变形超限问题, 甚至某区间盾构隧道完成施工后且地铁列车并未投入运营, 由于地表临时堆土导致盾构隧道发生了横椭圆变形超限^[7-8]。

针对地表超载作用下隧道变形问题, 文献[9]通过数值仿真与模型试验, 分析了地表超载大小、超载位置等因素对隧道变形的影响; 文献[10]采用数值仿真分析了土体力学参数对隧道变形的影响, 文献[11]采用数值仿真分析了软土地层中盾构隧道的变形与土压力, 但未从机理上阐明隧道变形超限。然而从现有研究来看, 主要为地表超载对既有盾构隧道影响因素的定性分析, 且很少去探究地表超载作用下隧道所受到的土压力, 更未比较隧道位于软土地层与硬土地层状态下隧道变形与土压力的差异, 以及地表超载作用下隧道所处地层的不同对隧道变形的影响机制。

从现有资料调研来看, 地表超载诱发的隧道横椭圆变形超限的问题主要发生在软地层中^[9-16], 而在硬土地层中因地表超载导致盾构隧道变形超限的问题很少发生。为了研究地表超载对软、硬地层中既有盾构隧道的影响, 通过隧道与地层相互作用的模型试验, 对地表超载作用下盾构隧道的变形、竖向土压力及土体沉降位移进行了量测, 分析地表超载作用对软、硬地层中既有盾构隧道的影响差异。

1 模型试验简介

1.1 模型隧道设计简介

本次模型试验所用的模型盾构隧道的几何相似比为 1:10, 并以几何相似常数 $C_l=10$ 和重度相似常数 $C_\gamma=1$ 为基础进行相似设计^[17]。原型盾构隧道为上海地铁盾构隧道, 其横断面几何参数如图 1 所示, 管片幅宽为 1.2 m, 采用通缝拼装。模型隧道管片厚度以满足外力作用下产生相似的变形作为条件进行设计。在多种加工材料综合比较后, 确定采用弹性模量为 2.7 GPa 的尼龙加工模型盾构隧道, 关于模型盾构隧道的详细设计方法及如何权衡相似因素问题详细见文献[17]。根据变形相似关系, 确定了模型盾构隧道的管片厚度为 38.3 mm。

根据足尺试验结果反分析得到的接头抗弯刚度^[18], 并结合模型接头抗弯刚度与原型接头抗弯刚度的相似关系, 得到了管片环开槽纵缝模型接头的开槽参数, 对应的模型盾构隧道管片环如图 2 所示^[19]。因盾构隧道采用通缝拼装, 当隧道发生横椭圆变形时, 近似地认为管片环之间无弯矩传递, 为此, 管片环缝连接螺

栓采用一根长度为 40 mm、直径为 4 mm 的钢棒代替, 其两端无螺母。

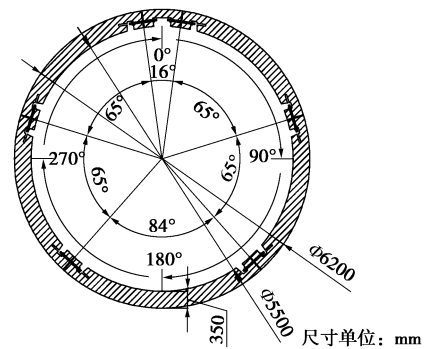


图 1 原型盾构隧道横断面

Fig. 1 Cross section of prototype shield tunnel



图 2 开槽纵缝接头模型隧道管片环

Fig. 2 Segment rings of shield tunnel model with grooved model joints

1.2 模型土配制简介

根据文献[17]分析表明, 模型土的黏聚力与内摩擦角可以不满足相似关系, 当在弹性范围内设计模型试验时, 模型土的压缩模量尽量满足相似关系。此外, 土体同时也是隧道结构荷载的来源, 因此, 土体的重度相似也较关键。在综合权衡后, 试验中配制了 3 种模型土, 分别为橡胶粒、细砂及橡胶粒与细砂的混合土, 模型土取压应力为 10 kPa 到 20 kPa 时对应的压缩模量, 分别为 0.35, 2.65, 0.85 MPa, 相应的原型土的压缩模量为 3.5, 26.5, 8.5 MPa^[17]。

1.3 试验方案简介

土箱采用型钢加工骨架, 再镶嵌厚度为 2 cm 的有机玻璃, 土箱内部的长、宽、高分别为 3.1, 1.1, 2 m。为了方便试验, 先填筑隧道下卧土层, 再放置模型隧道, 然后采用逐层填筑的方式填筑隧道侧部与上部的土体, 当填土到土箱顶部后, 再均匀堆放砂袋。然而, 实际中的盾构隧道上覆土层在隧道修建前已经存在, 为此, 试验分析时假设模型隧道上覆土一部分为隧道既有的上覆土层, 其他则视为地表超载。

为了探究地表超载作用下隧道所处地层对既有盾构隧道的影响, 设计了 3 种不同工况的模型试验, 其

区别为隧道穿越土层不同,分别为橡胶粒、混合土、细砂,试验编号依次为1,2,3。隧道上覆土层与下卧土层均为细砂,模型试验现场如图3所示。

对隧道变形、土压力及土体沉降进行了量测,土压力盒的布置位置如图4所示,关于模型试验的相似设计、误差权衡、方案设计在文献[17]中有详细说明。



图3 模型试验现场

Fig. 3 Model test field

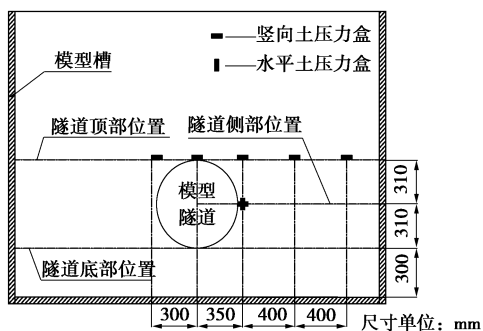


图4 土压力盒的布置示意图

Fig. 4 Distribution of earth pressure cells

2 试验结果分析

2.1 隧道结构变形分析

图5为土体逐层填筑过程中模型隧道的收敛变形,图中横坐标为隧道上覆土层厚度,也即填土表面到隧道顶点的距离, D 为模型隧道的外径,为0.62 m(工程中通常以多少倍隧道的外径作为上覆土厚度单位),“ $-1D$ ”表示模型隧道刚放入土箱中,“ $-0.5D$ ”表示模型隧道侧部填土到与隧道中心同高度位置,“ $0D$ ”则表示填土到模型隧道顶部。

从图5可以看出,在模型隧道侧部填土过程中,隧道发生竖椭圆变形(竖直径大于水平直径),因为此时隧道的竖向土压力几乎可以忽略不计,主要为水平土压力。在隧道上覆土层逐层填筑过程中,隧道发生横椭圆变形(水平径大于竖直径)。

考虑到隧道上覆土采用逐层填筑,与实际中的盾构隧道施工有所不同,为此,假设隧道既有的上覆土厚度为 $1D$,大于 $1D$ 的上覆土则视为地表超载,则得

到3种工况条件下不同地表超载时隧道的收敛变形如图6所示。从图6可以看出,当隧道位于软土地层时,相同地表超载作用下导致的隧道收敛变形明显要大于隧道位于硬土地层时隧道的收敛变形。

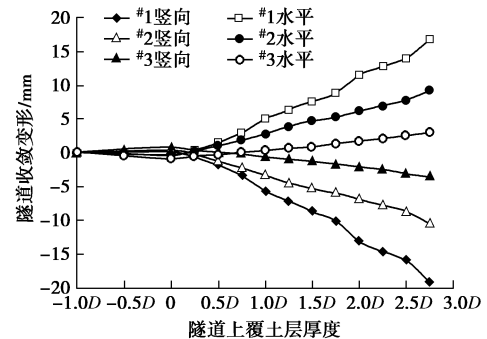


图5 不同上覆土层厚度时隧道收敛变形

Fig. 5 Deformations of tunnel under different overlaying soils

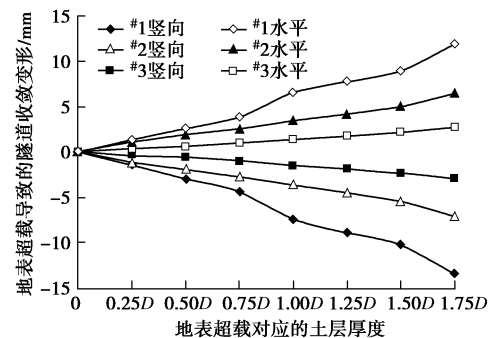


图6 地表超载导致的隧道收敛变形

Fig. 6 Deformations of tunnel induced by surface surcharge

2.2 土压力分析

图7为隧道顶部位置的竖向土压力(因土压力盒数量有限,左右未对称布置土压力盒,如图4所示)。从图7(a)和图7(b)中可以看出,隧道穿越土层为橡胶粒或混合土时,逐层填筑过程中模型隧道正上方的竖向土压力明显要大于其侧部的竖向土压力,即表现为明显的被动土拱土压力^[20]。然而,当隧道穿越土层为细砂时,逐层填筑过程中隧道顶部的竖向土压力模式(如图7(c)所示)刚好与图7(a)和图7(b)相反,即模型隧道正上方的竖向土压力明显要小于其侧部的竖向土压力,表现为主动土拱土压力^[21]。

假设隧道既有的上覆土厚度为 $1D$,大于 $1D$ 的上覆土则视为地表超载,得到了地表超载导致的隧道顶部竖向土压力如图8所示。图7,8的相同工况对应的竖向土压力模式接近。 $1.75D$ 上覆土的地表超载若按土柱理论计算,模型隧道中心正上方的竖向土压力约为21.70 kPa,图8(a)和图8(b)中模型隧道正上方的竖向土压力分别为36.77, 30.72 kPa,明显要大于要大小21.70 kPa,而图8(c)为21.88 kPa,与土柱理论土压力接近,但其侧部的竖向要大于21.88

kPa, 属于典型的主动土拱土压力^[21]。理论上图 8 (c) 中模型隧道正上方的竖向土压力要小于土柱理论土压力, 土压力偏大与一定厚度土压力盒产生了竖向土压力集中有关^[22]。

图 7 (c) 与图 8 (c) 在测点距离隧道中心的水平距离 115 cm 的竖向土压力比隧道中心正上方的竖向土压力还要小, 产生此现象主要与上部逐层填土过程中下部土体压缩变形而向下沉降, 土体与土箱内壁产生竖向摩擦, 导致接近土箱内壁的土压力要偏小, 这也是模型试验中无法避免的边界效应问题之一。

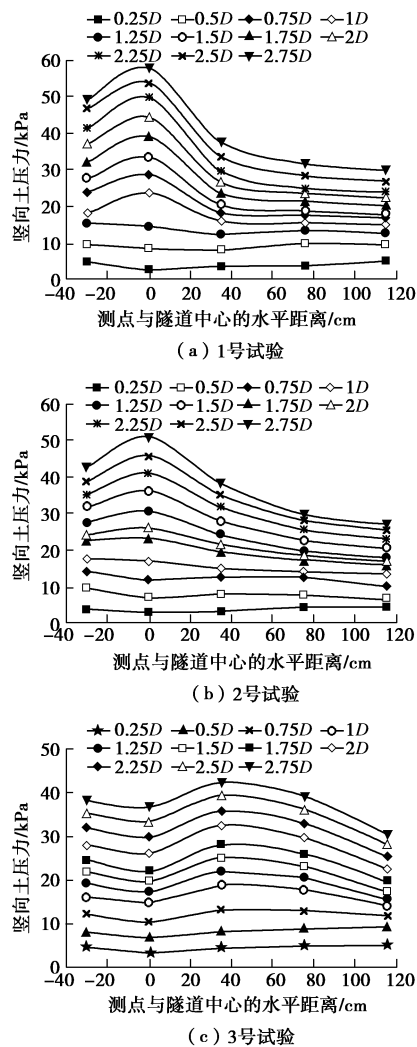


图 7 不同上覆土厚度时隧道顶部位置竖向土压力

Fig. 7 Vertical earth pressures at top of tunnel for different overlaying soils

图 9 为逐层填土过程中隧道侧部的实测竖向土压力与水平土压力, 其土压力盒布设位置如图 4 所示。在隧道上覆土厚度为 2.75D 时, 1, 2, 3 号试验在图 9 (a) 中的土柱理论土压力分别为 35.71, 37.34, 39.12 kPa (因隧道穿越土层的重度不同, 所以 3 个试验的相同位置土柱理论土压力也不同), 而实测结果分别为 22.06, 30.54, 42.30 kPa, 即 1, 2 号试验模型隧道侧部的实测竖向土压力小于土柱理论土压力分别为

13.65, 6.80 kPa, 而 3 号试验模型隧道侧部的实测竖向土压力大于土柱理论土压力为 3.18 kPa。此大小关系与图 7 中隧道中心正上方的竖向土压力刚好相反。

图 9 (b) 中隧道侧部的水平土压力与图 9 (a) 中隧道侧部的竖向土压力大小关系一致, 即从 1 号试验到 3 号试验依次增大。由以上分析可知, 当隧道穿地越软弱, 地表超载作用下隧道顶部的竖向土压力越大, 而隧道侧部的水平土压力越小, 因此隧道顶部的竖向土压力与隧道侧部的水平土压力的差值越大, 隧道越容易发生横椭圆变形。

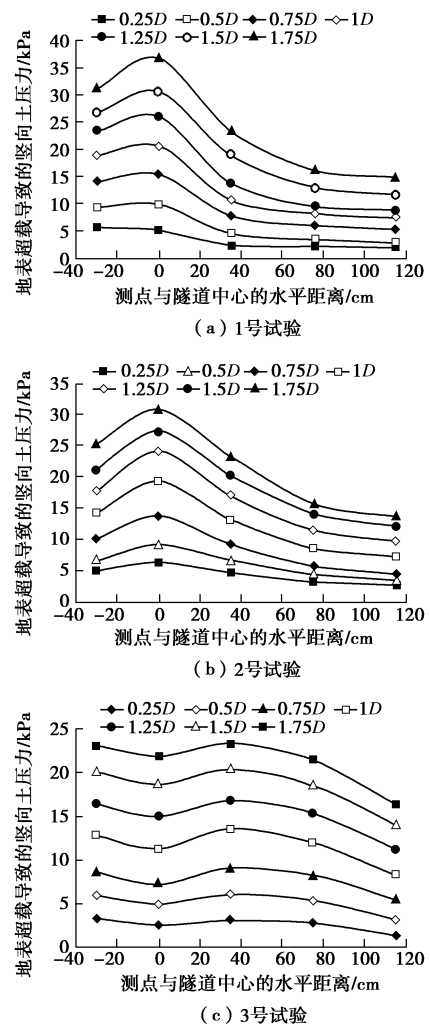
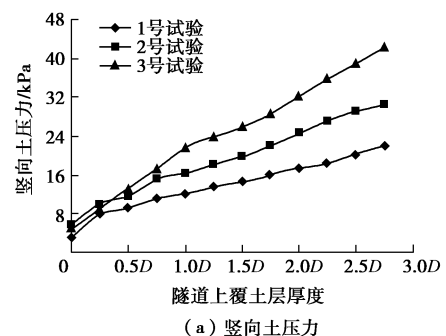


图 8 地表超载导致的顶部位置竖向土压力

Fig. 8 Vertical earth pressures at top of tunnel induced by surface surcharge



(a) 竖向土压力

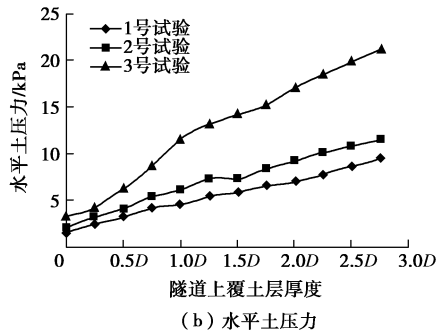
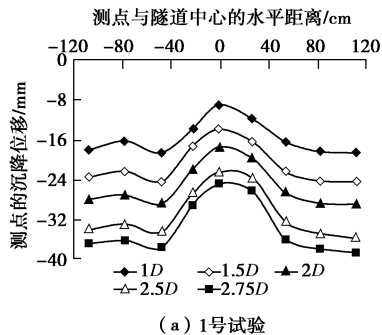


图9 模型隧道侧部的竖向与水平土压力

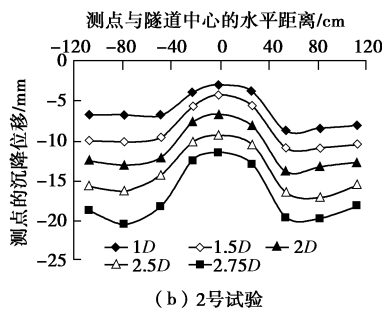
Fig. 9 Vertical and horizontal earth pressures at lateral side of model tunnel

2.3 土体沉降分析

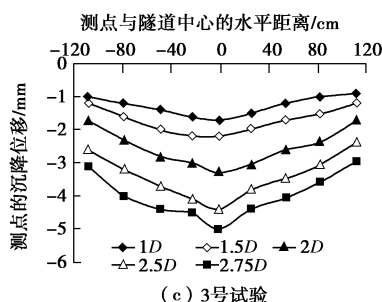
图10为模型隧道顶部的沉降位移(沉降向下,所以取为负值)。由此可见,上部逐层堆载时,隧道上覆土层发生了不均匀沉降,且随着堆载的逐渐增加,不均匀沉降加剧。隧道穿越软土(1, 2号试验)与硬土(3号试验)时,隧道上覆土层的沉降趋势截然不同。图11为隧道底部的土体沉降,土体沉降趋势与图10中相应工况土体沉降趋势相反(试验时模型隧道左下部与右下部的土体不便于压实,导致距离隧道中心约 ± 25 cm位置的竖向沉降偏小,因此出现图11(c)所



(a) 1号试验



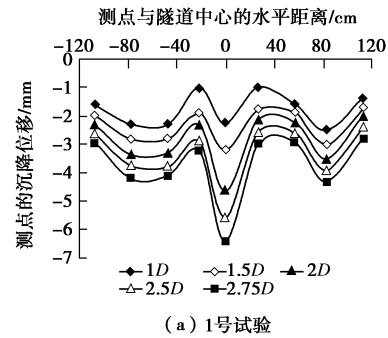
(b) 2号试验



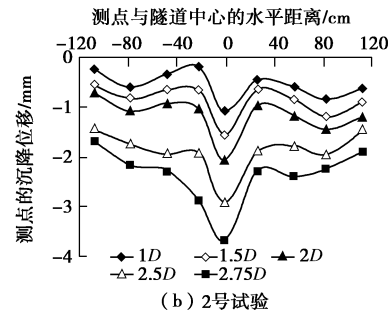
(c) 3号试验

图10 模型隧道顶部位置的土体沉降

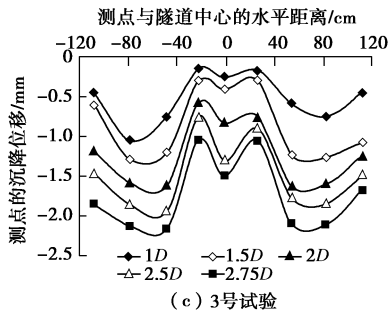
Fig. 10 Soil settlements at top of model tunnel



(a) 1号试验



(b) 2号试验



(c) 3号试验

图11 模型隧道底部位置的土体沉降

Fig. 11 Soil settlements at bottom of model tunnel

示的沉降趋势线)。图10, 11中在距离隧道约 ± 110 cm位置的测点的沉降偏小, 主要与土层沉降时将受到土箱内壁的竖向摩擦力有关。

根据图10, 11的土体沉降结果, 即可计算出逐层填土到隧道上覆厚度为 $2.75D$ 时隧道穿越土层的竖向压缩量, 如图12(a)所示, 其中水平坐标为0位置的竖向压缩量也是隧道的竖向收敛变形。对于1, 2号试验, 隧道的竖向收敛变形(横坐标为0位置的压缩量)小于其两侧隧道穿越土层的竖向压缩量; 对于3号试验, 隧道的竖向收敛变形(横坐标为0位置的压缩量)大于其两侧隧道穿越土层的竖向压缩量。若将隧道既有上覆土厚度假设为 $1D$, 则最终的隧道地表超载对应的土层厚度为 $1.75D$, 此时地表超载导致的隧道穿越土层压缩量如图12(b)所示, 其总体趋势与图12(a)相同。

由图10~12可知, 当隧道穿越土层的竖向压缩量较小时(如1, 2号模型试验), 地表超载后隧道的竖向收敛变形量小于其两侧穿越土层的竖向压缩量, 两者之间的关系如图13(b)所示; 反之, 隧道竖向收敛变形与其穿越土层竖向压缩量之间的关系如图13(c)所示。由土拱的形成机理可知, 隧道上覆土层的

土体间发生不均匀沉降是隧道顶部呈现出土拱土压力的直接原因^[20-21]。由此可见,在地表超载作用下,隧道的竖向收敛变形与两侧穿越土层的竖向压缩量的关系决定了隧道上覆土层的土体沉降状态,进而决定的隧道的竖向土压力。而隧道的竖向收敛变形与其横向变形刚度有关,穿越土层的竖向压缩量与土体的压缩模量有关,因此,在地表超载作用下,隧道横断变形刚度与穿越土层的土体压缩模量共同决定隧道上覆土层的沉降状态,从而决定了地表超载对既有盾构隧道的影响。

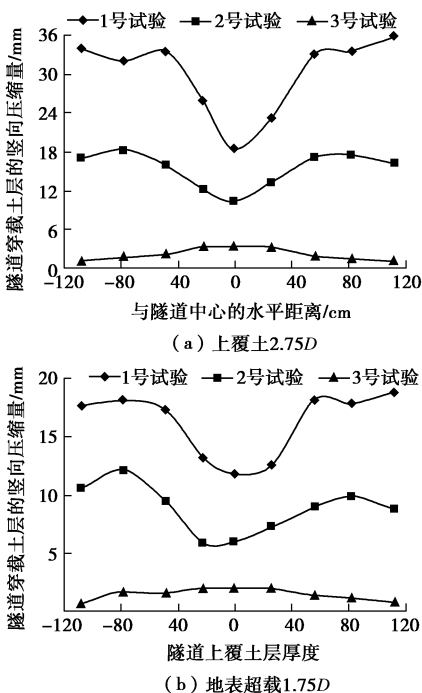


图 12 隧道穿越土层的竖向压缩量
Fig. 12 Vertical compression of throughsoil

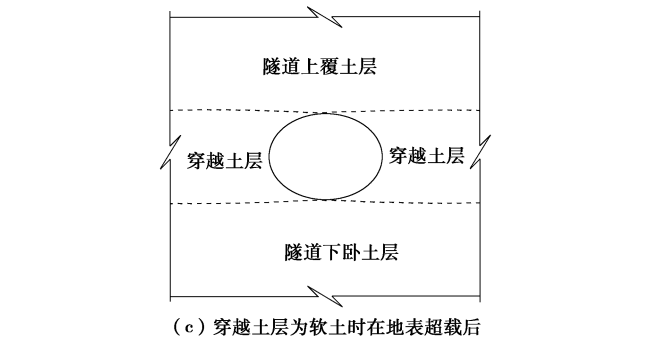
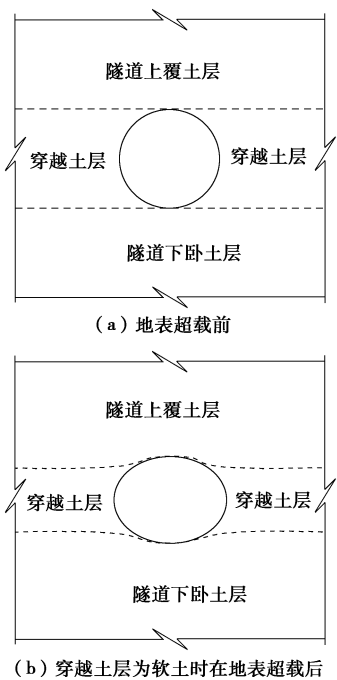


图 13 地表超载作用下隧道竖向收敛变形与穿越土层竖向压缩量之间的关系
Fig. 13 Relationship between vertical deformation of tunnel and vertical compression of soils under surface surcharge

3 结 论

通过几何相似比为 1 : 10 的模型试验开展了地表超载对既有盾构影响的试验研究,对比分析了隧道穿越土层的土体压缩模量不同的工况下隧道变形、隧道顶部竖向土压力及侧部竖向与水平土压力、隧道顶部与底部的土体沉降,主要得到以下结论:

(1)在地表超载作用下,当隧道位于软土地层时,相同地表超载作用下导致的隧道收敛变形明显要大于隧道位于硬土地层时隧道的收敛变形。

(2)当隧道穿越软土地层时,地表超载作用下隧道上覆土层表现为被动土拱土压力;当隧道穿越硬土地层时,地表超载作用下隧道上覆土层表现主动土拱土压力。

(3)通过土体沉降测试结果计算,得到了隧道竖向收敛变形与其穿越土层竖向压缩量之间的关系,分析表明,隧道横断变形刚度与穿越土层的土体压缩模量共同决定隧道上覆土层的沉降状态,从而决定了地表超载对既有盾构隧道的影响。

参考文献:

[1] 毕湘利, 柳 献, 王秀志, 等. 内张钢圈加固盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(11): 128 - 137. (BI Xiang-li, LIU Xian, WANG Xiu-zhi, et al. Experiment study on the ultimate load-bearing capacity of deformed segmental tunnel linings strengthened steel plates[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(11): 128 - 137. (in Chinese))

[2] 柳 献, 张浩立, 鲁 亮, 等. 超载工况下盾构隧道结构承载能力的试验研究[J]. 地下工程与隧道, 2013(4): 10 - 16. (LIU Xian, ZHANG Hao-li, LU Liang, et al. Experimental study on load bearing capacity of shield tunnel structure

- under overload condition[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 2013(4): 10 - 16. (in Chinese))
- [3] 毕湘利, 柳 献, 王秀志, 等. 通缝拼装盾构隧道结构极限承载力的足尺试验研究[J]. *土木工程学报*, 2014, **47**(10): 117 - 127. (BI Xiang-li, LIU Xian, WANG Xiu-zhi, et al. Experimental investigation on the ultimate bearing capacity of continuous-jointed segmental tunnel linings[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2014, **47**(10): 117 - 127. (in Chinese))
- [4] 邵 华, 黄宏伟, 张东明, 等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. *岩土工程学报*, 2016, **38**(6): 1036 - 1043. (SHAO Hua, HUANG Hong-wei, ZHANG Dong-ming, et al. Case study on repair work for excessively deformed shield tunnel under accidental surface surcharge in soft clay[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, **38**(6): 1036 - 1043. (in Chinese))
- [5] CHOO J H, LEE T J, YOON T G, et al. The enhancement of performance on road tunnel lining by repair and rehabilitation[M]. Boca Raton: CRC Press-Taylor & Francis Group, 2013.
- [6] 魏 纲, 张 佳, 洪文强. 地表堆载对临近既有盾构隧道影响的研究综述[J]. *低温建筑技术*, 2017, **39**(6): 79 - 82. (WANG Gang, ZHANG Jia, HONG Wen-qiang. A review of the research on the impact of ground load on adjacent existing shield tunnel[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2017, **39**(6): 79 - 82. (in Chinese))
- [7] 黄大维, 周顺华, 赖国泉, 等. 地表超载作用下盾构隧道劣化机理与特性[J]. *岩土工程学报*, 2017, **39**(7): 1173 - 1181. (HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, LAI Guo-quan, et al. Mechanisms and characteristics for deterioration of shield tunnels under surface surcharge[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, **39**(7): 1173 - 1181. (in Chinese))
- [8] 程 茜, 宫全美. 地铁盾构隧道下穿城市公园地基加固宽度分析[J]. *西南交通大学学报*, 2018, **35**(3): 15 - 22. (CHENG Xi, GONG Quan-mei. Analysis on reinforcement width of subway shield tunnel underpassing city park[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2018, **35**(3): 15 - 22. (in Chinese))
- [9] 吴 庆, 杜守继. 地面堆载对既有盾构隧道结构影响的试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, **10**(1): 57 - 66. (WU Qing, DU Shou-ji. Model test on influence of ground heaped load on existing shield tunnel structure[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, **10**(1): 57 - 66. (in Chinese))
- [10] 王如路, 张冬梅. 超载作用下软土盾构隧道横向变形机理及控制指标研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(6): 1092 - 1101. (WANG Ru-lu, ZHANG Dong-mei. Mechanism of transverse deformation and assessment index for shield tunnels in soft clay under surface surcharge[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(6): 1092 - 1101. (in Chinese))
- [11] 张明告, 周顺华, 黄大维, 等. 地表超载对地铁盾构隧道的影响分析[J]. *岩土力学*, 2016, **37**(8): 2271 - 2278. (ZHANG Ming-gao, ZHOU Shun-hua, HUANG Da-wei, et al. Analysis of influence of surface on subway shield tunnel under[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, **37**(8): 2271 - 2278. (in Chinese))
- [12] ZHANG Zhi-guo, HUANG Mao-song. Geotechnical influence on existing subway tunnels induced by multiline tunneling in Shanghai soft soil[J]. *Comput Geotech*, 2014, **56**: 121 - 132.
- [13] 杨雨冰, 周 彪, 谢雄耀. 邻近基坑施工作用下盾构隧道横向变形及开裂特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, **35**(增刊 2): 4082 - 4093. (YANG Yu-bing, ZHOU Biao, XIE Xiong-yao. Study on transverse deformation and cracking property of shield-driven tunnel induced by excavation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, **35**(S2): 4082 - 4093. (in Chinese))
- [14] HUANG Hong-wei, ZHANG Dong-ming. Resilience analysis of shield tunnel lining under extreme surcharge: Characterization and field application[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, **51**: 301 - 312.
- [15] ZHANG Zhi-guo, HUANG Mao-song. Geotechnical influence on existing subway tunnels induced by multiline tunneling in Shanghai soft soil[J]. *Comput Geotech*, 2014, **56**: 121 - 132.
- [16] 黄大维, 周顺华, 冯青松, 等. 地表均布超载作用下软土地区既有盾构隧道对地层相对挤压量的计算方法[J]. *中国铁道科学*, 2018, **39**(4): 93 - 100. (HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, FENG Qingsong, et al. Calculation method for relative extrusion on surrounding ground by existing shielded tunnel in soft soil area under uniform surface surcharge load[J]. *China Railway Science*, 2018, **39**(4): 93 - 100. (in Chinese))
- [17] 黄大维, 周顺华, 冯青松, 等. 盾构隧道与地层相互作用的模型试验设计[J]. *铁道学报*, 2018, **40**(6): 127 - 135. (HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, FENG Qing-song, et al. Scaled model test design for interaction between shield tunnel

and stratum[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, **40**(6): 127 - 135. (in Chinese))

[18] 黄大维, 周顺华, 冯青松, 等. 通缝拼装盾构隧道横向刚度有效率计算方法及其影响因素[J]. 中国铁道科学, 2017, **38**(3): 47 - 54. (HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, FENG Qing-song, et al. Algorithm of transverse effective rigidity ratio for non-staggering installed shield-driven tunnel and its influential factors[J]. China Railway Science, 2017, **38**(3): 47 - 54. (in Chinese))

[19] 黄大维, 周顺华, 王秀志, 等. 模型盾构隧道管片纵缝接头设计方法[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(6): 1068 - 1076. (HUANG Da-wei, ZHOU Shun-hua, WANG Xiu-zhi, et al. Design method for longitudinal segment joints of shield tunnel model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(6): 1068 - 1076. (in Chinese))

[20] CHARLES H E. An examination of arching in granular soils[D]. Massachusetts America: Massachusetts Institute of Technology, 1984.

[21] 宫全美, 张润来, 周顺华, 等. 基于颗粒椭球的隧道松动土压力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(1): 99 - 105. (GONG Quan-mei, ZHANG Run-lai, ZHOU Shun-hua, et al. Method for calculating loosening earth pressure around tunnels based on ellipsoid theory of particle flows[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(1): 99 - 105. (in Chinese))

[22] 芮 瑞, 吴端正, 胡 港, 等. 模型试验中膜式土压力盒标定及其应用[J]. 岩土工程学报, 2016, **38**(5): 837 - 845. (RUI Rui, WU Duan-zheng, HU Gang, et al. Calibration tests on diaphragm-type pressure cells[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, **38**(5): 837 - 845. (in Chinese))

本期广告索引

- 封 2 广州国光仪器有限公司
- 封 3 北京理正软件股份有限公司
- 封 4 南瑞集团水利水电技术分公司