

DOI: 10.11779/CJGE2024S10003

# 开挖面失稳导致地下结构变形破坏的离心模拟

张建红<sup>1</sup>, 王爱霞<sup>1</sup>, 陈湘生<sup>2</sup>

(1. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084; 2. 深圳大学土木与交通工程学院, 深圳 518060)

**摘要:** 城市密集地下工程结构群下进行地下空间开发遭遇复杂地质环境时, 可能会导致隧道开挖面失稳从而对既有结构的安全造成巨大威胁。开展了三个离心模型试验, 模拟均质粉土地基和有黏土夹层的粉土地基中多层既有地下结构, 研发了模拟隧道开挖面失稳的试验技术, 再现了施工扰动引发的土体破坏模式和既有结构变形破坏机理。试验表明, 控制开挖面位移 ( $0.48H$ ,  $H$  为开挖面高度) 或者开挖面附近存在黏土夹层时, 其附近形成的土拱有效地控制破坏区域, 显著降低既有隧道的变形和应变, 最终竖向变形为  $0.3\sim0.35$  m, 最大拉应变为 850 微应变; 如果开挖面位移增大至  $0.86H$ , 均质粉土地基出现整体失稳, 既有隧道的最终竖向变形 0.48 m, 最大拉应变达到 1900 微应变。

**关键词:** 地下工程结构群; 隧道开挖面失稳; 变形破坏机理

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2024)S1-0006-05

作者简介: 张建红(1967—), 女, 博士, 教授, 从事城市地下空间和海洋岩土工程研究。E-mail: cezhangjh@tsinghua.edu.cn。

## Centrifuge tests on deformation and failure mechanism of existing structures induced by displacements of excavation face

ZHANG Jianhong<sup>1</sup>, WANG Aixia<sup>1</sup>, CHEN Xiangsheng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** The development of cities often involves the construction of new tunnels underneath densely distributed existing structures. When the tunnels experience complicated and difficult conditions, failure may occur at the tunnel face and pose great threat to the existing structures. The results of three centrifuge tests to simulate existing structures in a uniform silt and in the silt with a 4 m thick clay layer are introduced. A technique is developed to simulate the instability of the excavation face and reproduce the failure mode. The tests show that when the displacement of the excavation face is controlled ( $0.48H$ , where  $H$  is the excavation height) or there is a clay interlayer near the excavation surface, soil arching is formed to confine the failure and reduce the deformation and strain of the existing tunnel. When the displacement of the excavation face increases to  $0.83H$ , an overall collapse is triggered and induce significant deformation and strain on the existing tunnel.

**Key words:** existing structure; instability of tunnel face; deformation and failure mechanism

## 0 引言

隧道掘进是城市地下空间开发最重要的方式<sup>[1]</sup>。在遭遇复杂地质环境时, 施工中的隧道可能会出现大规模的破坏。2003 上海地铁 4 号线董家渡段 238 m 长隧道垮塌和 2018 年广东佛山地铁 2 号线由于 40 m 长隧道垮塌造成了巨大的经济或生命损失<sup>[2-3]</sup>。目前对于深层地下结构破坏的致灾机理的认识远远不足, 迫切需要开展相关的机理研究。

隧道掘进引发的土体变形破坏机理很早就引起了关注。土工离心机采用离心场模拟重力场, 能够在小尺寸模型中再现原型特性和破坏机理, 从而被广泛用于研究隧道开挖面稳定性、应力传递、多隧道施工和结构的变形破坏问题研究<sup>[3-14]</sup>。

本文开展了 3 个离心模型试验, 考虑均质粉土地基和有黏土夹层的粉土地基, 模拟开挖面失稳过程和地下水条件变化, 观察地基和多层既有地下结构的响应, 讨论了地基中拱效应、开挖面位移等因素影响下的局部破坏和整体失稳模式。

## 1 离心模型和试验方法

图 1 为模拟既有地下结构和开挖面失稳的离心模型。既有结构为地下室、既有隧道、储存库和地下污水沟以及正在施工的新隧道。图 1 中竖向加载设备可

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52090084, 52279101)

收稿日期: 2024-04-29

以在地下室施加 300 kPa 坚向应力以模拟建筑自重。模型结构采用厚 5 mm 透明有机玻璃制成, 结构法向刚值为 327 MPa。模型箱侧面透明有机玻璃板外侧布置数字摄像头。地基侧面布置标志点, 利用图象处理技术分析标志点位移获得土体和结构变形特征。

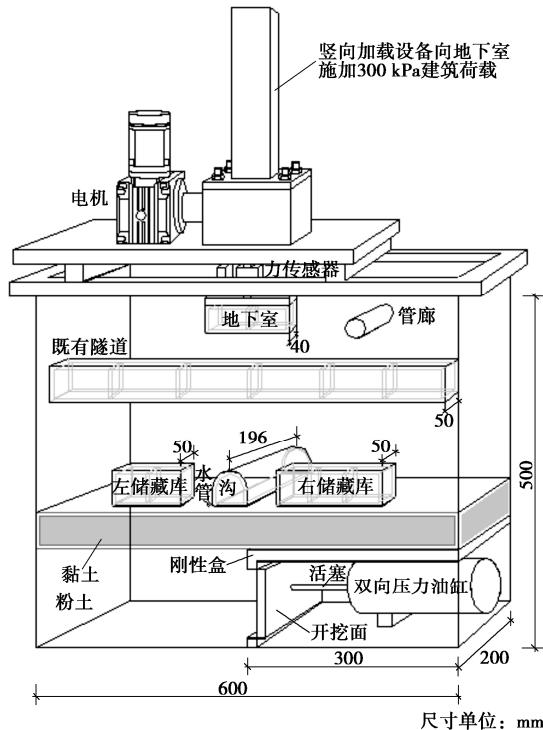


图 1 模拟开挖失稳的离心模型示意图 (模型比尺)

Fig. 1 Centrifuge model simulating failure of tunnel face

本文开展了三个离心模型试验。模型 1 为均质粉土地基, 开挖面位移为 2.9 m; 模型 2 在粉土地基中设黏土夹层, 开挖面位移为 6.6 m; 模型 3 为均质粉土地基, 开挖面最大位移为 6.9 m。粉土的液塑限分别为 25% 和 18.5%, 制样含水率 6%, 制样干密度  $1.50 \text{ g/cm}^3$ , 其有效黏聚力为  $6.0 \text{ kPa}$ , 内摩擦角  $28.9^\circ$ 。黏土具有较高塑性, 其塑性指数为 15.8, 制样含水率为 17%, 干密度  $1.60 \text{ g/cm}^3$ , 其有效黏聚力  $c=0.7 \text{ kPa}$ , 内摩擦角  $\varphi=30^\circ$ 。通过击实法制样, 顺序布置地下结构。

模型箱底部设置小型液压油缸连接钢板, 降低油压可模拟开挖面失稳并控制开挖面水平位移, 每次位移增量约为 10 mm。该技术的难点是克服高离心加速度下接触阻力, 实现小油缸活塞的水平运动。左储藏库和污水沟侧面和底面布置了 7 个微型土压力传感器以测量试验过程中土压力变化, 如图 2 所示。模型地基表面布置激光位移传感器测量地表沉降。

离心模型试验在清华大学土工离心机上进行, 离心加速度为  $60g$  和  $80g$ , 遵循离心模型相似比尺<sup>[2]</sup>。当模型地基在离心场中沉降稳定后, 向地下室施加 300 kPa 均布荷载, 再次沉降稳定后, 模拟开挖面失稳

过程。试验过程中通过摄像机记录地基和结构的变形和破坏。

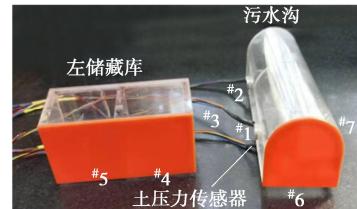


图 2 左储藏库和污水沟表面布置土压力传感器

Fig. 2 Earth pressure transducers on warehouse and sewer line

## 2 离心模型试验结果及分析

### 2.1 有限开挖面位移下拱效应和局部破坏

本节采用原型尺寸描述试验结果。模型 1 采用离心加速度  $60g$ 。试验中控制开挖面最大位移为  $2.9 \text{ m}$ , 或者  $0.48H$ ,  $H$  为开挖面的高度, 考察及时控制开挖面位移对变形破坏机理的影响。

图 3 为通过图像分析得到的地基中土体破坏区域的发展过程。图中数字为当前开挖面位移下结构最大沉降。图 3 显示了随开挖面位移增加, 土体在开挖面附近形成土拱, 土体失稳导致脱空和孔洞, 失稳区域向上发展, 在污水沟附近形成土拱, 终止于局部破坏。

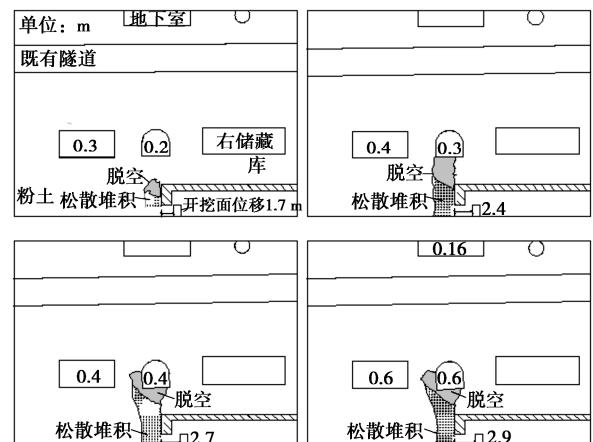


图 3 均质粉土控制开挖面位移造成的拱效应和局部破坏

Fig. 3 Local failure due to arching at limited face displacement

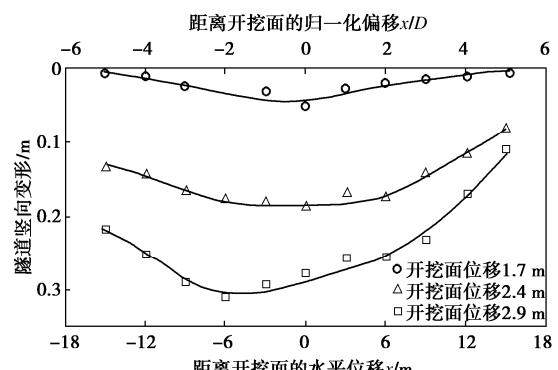


图 4 既有隧道的测量变形与开挖面位移的关系

Fig. 4 Tunnel deformations versus face displacement

由于既有隧道对不均匀变形非常敏感，是工程设计关注的重点。图 4 为通过图像分析获得的隧道沿轴线方向的竖向变形，图中  $D$  为既有隧道直径，横坐标中的零点为开挖面位置。图 4 显示，隧道变形随开挖面位移增加而快速增加，最大竖向变形发生在开挖面上部。在开挖面水平位移为 2.9 m 时，既有隧道最大竖向变形为 0.3 m，这时土体的位移矢量如图 5 所示，污水沟上方土体沉降最为显著，最大约为 0.6 m。

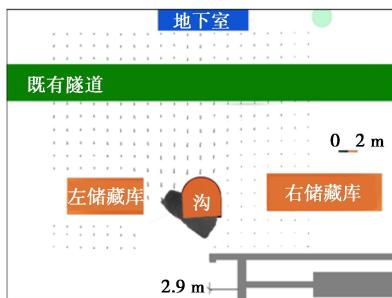


图 5 开挖面位移为 2.9 m 时土体的位移矢量

Fig. 5 Displacement vectors of soil at face displacement of 2.9 m

图 6 为试验中测量的土压力变化过程。污水沟底部由于土体破坏脱空，导致#6位置处土压力迅速降低，#4和#5位置因地基沉降土压力略有增加。图 7 比较了三种既有结构的沉降随着开挖面位移变化过程，当开挖面位移超过 2.7 m 时有迅速增大的趋势，如果在此位移节点及时控制开挖面位移，可能能够有效控制地基和既有结构的变形。

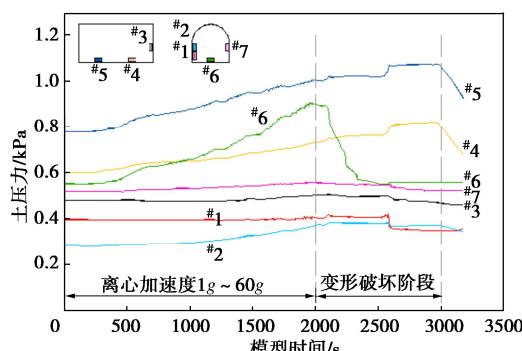


图 6 模型试验中测量的土压力变化

Fig. 6 Measured earth pressure versus model time

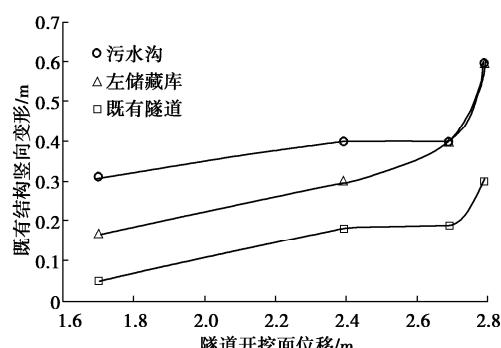


图 7 既有结构竖向变形随开挖面位移增加的特征

Fig. 7 Settlements of existing structures versus face displacement

## 2.2 粉土夹黏土层地基中的拱效应和局部破坏

模型 2 离心加速度提高至  $80g$ ，地基土深度达到 40 m。粉土地基中夹有一层厚度为 4 m 的高塑性黏土层。该黏土层位于开挖面与污水沟之间，如图 8 所示。试验目的在于考察黏土夹层和地下水变化对于土体和既有结构变形破坏机理的影响。开挖面水平最大位移达到 6.6 m，即  $0.83H$ 。开挖面失稳的过程中，污水沟处模拟了 0.75 kg（模型比尺）的地下水渗漏。

图 8 显示了当开挖面位移相对较小，为  $0\sim1.9$  m 时，土体的变形从开挖面发展至黏土层，形成土拱。土体的继续破坏使得脱空区达到污水沟底部，然后在污水沟左边向上发展，造成左储藏库和污水沟的沉降增加。当开挖面位移增至 6.6 m，破坏区域有所发展，但是由于拱效应的影响，破坏区域局限在污水沟附近。左储藏库和污水沟的最大沉降分别为 0.3 m 和 0.5 m，地下室的沉降为 0.15 m。

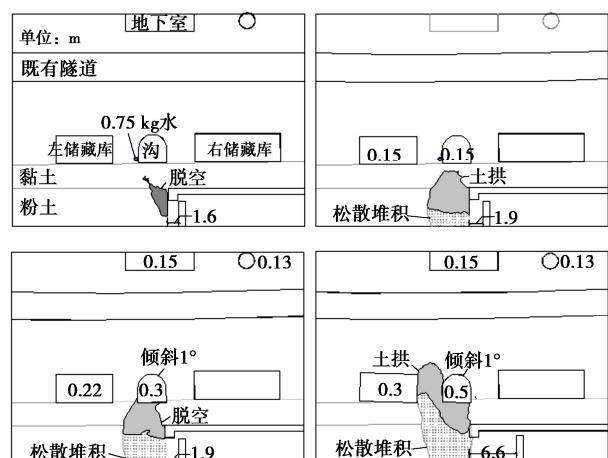


图 8 含黏土夹层地基中的拱效应和局部破坏

Fig. 8 Local failure due to soil arching near tunnel face

图 9 为开挖面位移为 6.6 m 时既有隧道的最终竖向变形和计算得到的拉应变，其中最大竖向变形为 0.35 m，最大拉应变为  $850 \mu\epsilon$  ( $\mu\epsilon$  是微应变)。与模型 1 相比，隧道最大变形相似，这两个模型中出现的土拱效应降低了对既有隧道的影响。

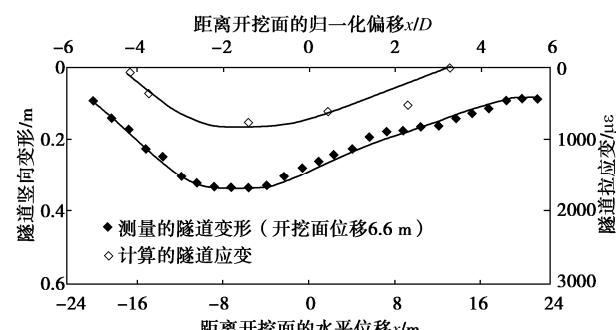


图 9 含黏土夹层地基中的既有隧道变形和应变

Fig. 9 Ultimate deformations and strains of existing tunnel

### 2.3 均质粉土地基中整体失稳

模型 3 为均质粉土地基, 采用 80g 的离心加速度。试验中控制开挖面位移逐级增加, 最大达到 6.9 m, 即  $0.86H$ 。试验主要目的是与模型 1 相比, 观察开挖面位移不加控制的条件下, 地基和既有结构的变形破坏机理。试验中没有引入地下水的变化。

图 10 显示开挖面位移在 3.2 m 时, 土体中出现土拱现象。但是, 随着开挖面位移增大, 拱效应消失, 土中破坏区域向上发展。当开挖面位移达到 6.9 m 时, 污水沟突然坠落 3.9 m, 土体迅速发生整体失稳, 形成一个漏斗形的塌落区域。该失稳区域延伸至地面, 但是绕过既有隧道和地下室。地基破坏影响的区域主要是污水沟, 对于储藏库和地下室的影响不明显。

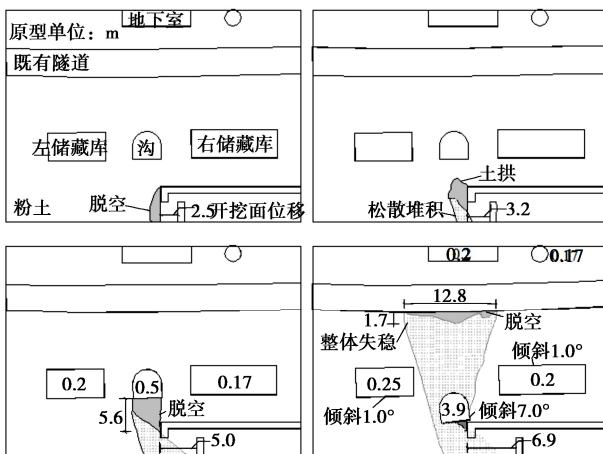


图 10 均质粉土开挖面失稳导致的地基和结构的变形破坏

Fig. 10 Deformations and failure induced by face failure in silt

图 10 中显示, 地基整体失稳使得既有隧道下形成一个长 12.8 m, 深 1.7 m 的脱空区, 该脱空区导致既有隧道产生显著变形, 如图 11 所示。当开挖面位移为 2.5 m 和 2.7 m 时, 既有隧道的变形相对均匀。当开挖面位移为 5.0 m 时, 土体破坏区域发展到污水沟, 既有隧道中部的变形明显增加; 当开挖面位移为 6.9 m 时, 地基发生整体失稳, 隧道的竖向变形达到 0.48 m。图 12 显示了隧道的最终变形和计算的隧道应变, 隧道拉应变高达  $1900 \mu\epsilon$ 。

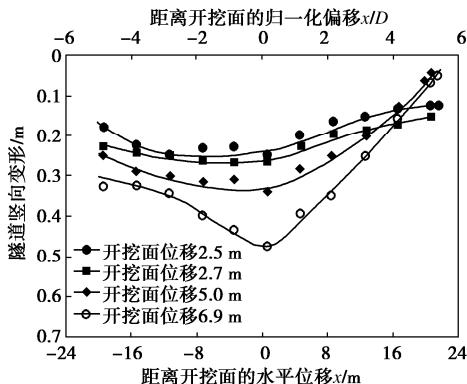


图 11 粉土地基中随开挖面位移增加既有隧道的变形特征

Fig. 11 Deformations of existing tunnel with face displacement

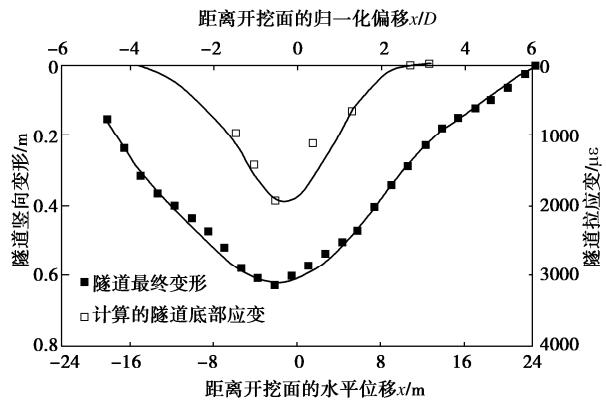


图 12 粉土地基中既有隧道的最终变形和应变

Fig. 12 Ultimate deformations and strains of existing tunnel

表 1 比较了三个模型试验的地基条件、开挖面位移、破坏模式和既有隧道的最终变形和拉应变。试验结果表明, 及时控制开挖面失稳位移, 如模型 1, 可以有效降低其引起的灾害, 将破坏限制在开挖面附近。如果开挖面附近土体与结构的相互作用得到增强, 如模型 2, 能够增强土体中的拱效应, 显著减小破坏发展的范围。然而如果开挖面位移得不到有效控制, 如模型 3, 地基将发生大规模的破坏, 既有隧道的变形, 尤其是最大拉应变显著增大。图 13 比较了均质粉土地基和含夹层地基中, 既有隧道的最终形和隧道底部拉应变。和模型 1 和 2 相比, 模型 3 中既有隧道的竖向变形增大约 37%~60%, 隧道拉应变增加超过 1 倍。

表 1 三个模型试验条件和结果比较

Table 1 Comparisons of model conditions and test results

模型编号	模型 1	模型 2	模型 3
地基	均质粉土	粉土夹黏土	均质粉土
开挖面位移	2.9 m	6.6 m	6.9 m
地基破坏模式	局部破坏	局部破坏	整体失稳
隧道最大竖向变形	0.3 m	0.35 m	0.48 m
隧道最大拉应变	—	850 $\mu\epsilon$	1900 $\mu\epsilon$

注:  $\mu\epsilon$  是微应变。

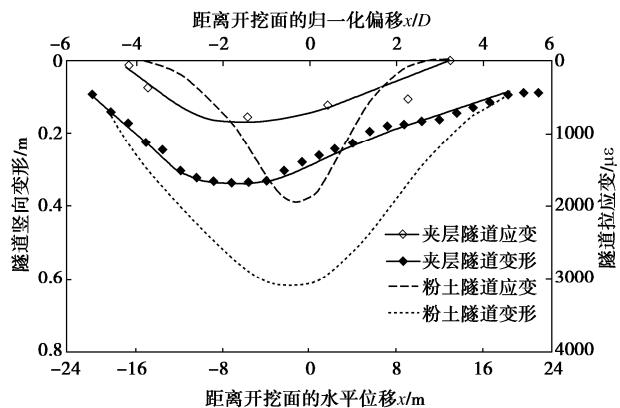


图 13 粉土和夹层地基中既有隧道变形和应变比较

Fig. 13 Comparisons of test results in silt and interlayered models

### 3 结 论

本文开展了三个离心模型试验，模拟均质粉土地基和有黏土夹层的粉土地基中既有建筑地下室、浅层隧道、储存库和地下污水沟，研发了模拟隧道开挖面失稳的试验技术，通过数字图像处理技术分析了开挖面失稳引发的土体和既有结构变形破坏的机理。主要结论如下：

(1) 均质粉土地基中开挖面最大位移为 2.9 m 或  $0.48H$  时，对于既有地下结构的变形是一个临界点。此时土体中出现拱效应，土体破坏局限于污水沟附近，对既有隧道的变形影响较小，既有隧道最终竖向变形为 0.3 m。

(2) 粉土中含有高塑性的黏土夹层时，如果夹层位于开挖面和污水沟之间，可以显著增强开挖面附近土与结构的相互作用，虽然地下水发生了变化、开挖面位移达到 6.6 m 或  $0.83H$ ，污水沟附近出现了土拱效应，破坏区域虽有增加，但是仍被明显的限制在开挖面附近，从而降低了对既有隧道的影响，隧道最终竖向变形为 0.35 m，隧道最终拉应变为  $850 \mu\epsilon$ 。

(3) 如果均质粉土地基中开挖面失稳时没有及时得到控制，开挖面位移达到 6.9 m 或  $0.86H$ ，开挖面失稳导致的破坏比较迅速地向上发展，造成污水沟发生坠落，诱发土体坍塌，形成整体失稳。该失稳对于既有隧道的影响非常显著。既有隧道最终竖向变形为 0.48 m，隧道拉应变达到  $1900 \mu\epsilon$ 。

### 参 考 文 献：

- [1] 陈湘生, 徐雅洁, 白 雪, 等. 高密度城市居住区地下空间综合规划模式探索[J]. 地下空间与工程学报, 2022, **18**(1): 1-11. (CHEN Xiangsheng, XU Yajie, BAI Xue, et al. Exploration on the comprehensive planning mode of underground space in high-density urban residential areas[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, **18**(1): 1-11. (in Chinese))
- [2] TAN Y, LU Y, WANG D L. Catastrophic Failure of Shanghai Metro Line 4 in July, 2003: Occurrence, emergency response, and disaster relief[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2021, **35**(1): 04020125.
- [3] ZHANG J H, WANG A X, ZHANG L M, et al. Coupling failure mechanism of underground structures induced by construction disturbances[J]. Mathematics 2023, **11**(3): 615. <https://doi.org/10.3390/math11030615>– 26 January 2023.
- [4] MAIR R J. Centrifugal Modelling of Tunnel Construction in Soft Clay[D]. Cambridge: University of Cambridge, 1979.
- [5] MARSHALL A M, FARRELL R, KLAR A, et al. Tunnels in sands: the effect of size, depth and volume loss on greenfield displacements[J]. Geotechnique, 2012, **62**(5): 385-399.
- [6] XU J M, FRANZA A, MARSHALL A M, et al. Tunnel-framed building interaction: comparison between raft and separate footing foundations[J]. Géotechnique, 2021, **71**(7): 631-644.
- [7] KONIG D, GRITTIER U, JESSBERGER H L. Stress redistributions during tunnel and shaft constructions[C]// Proceedings of International Conference on Centrifuge 1991, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1991: 129-138.
- [8] CHAMPAN D N, AHN S K, HUNT D V L, et al. The use of model tests to investigate the ground displacement associated with multiple tunnel construction in soil[J]. Tunnels & Tunneling, 2006, **21**(3): 413.
- [9] HAGIWARA T, GRANT R J, CALVELLO M, et al. The effect of overlying strata on the distribution of ground movements induced by tunneling in clay[J]. Soils and Foundations, 1999, **39**(3): 63-73.
- [10] SHARMA J S, HEFNY A M, ZHAO J, et al. Effect of large excavation on deformation of adjacent MRT tunnels [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, **16**(2): 93-98.
- [11] GIARDINA G, DEJONG M J, MAIR R J. Interaction between surface structures and tunneling in sand: centrifuge and computational modelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, **50**: 465-478.
- [12] RITTER S, GIARDINA G, FRANZA A, et al. Building deformation caused by tunneling: centrifuge modeling[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, **146**(5): 04020017.
- [13] MENG F Y, CHEN R P, XU Y, et al. Centrifuge modeling of effectiveness of protective measures on existing tunnel subjected to nearby excavation[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, **112**: 103880.
- [14] 张宇亭, 安晓宇, 晋亚斐. 隧道开挖引起上部建筑物沉降的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(增刊 2): 54-57. (ZHANG Yuting, AN Xiaoyu, JIN Yafei. Centrifugal model tests on settlement of structures caused by tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(S2): 54-57. (in Chinese))

(编校：明经平)