

DOI: 10.11779/CJGE2022S2012

# 隧道开挖引起上部建筑物沉降的离心模型试验研究

张宇亭, 安晓宇, 晋亚斐

(交通运输部天津水运工程科学研究所港口水工建筑技术国家工程研究中心, 天津 300456)

**摘要:** 地下隧道选线时, 常不可避免的出现下穿建筑物的情况。为保证上部建筑物的安全稳定性, 需要控制下穿隧道引起的建筑物基础的沉降。不同基础型式的建筑物在下穿隧道施工中, 沉降变化不同。通过三维离心模型试验, 研究了双管大型隧道开挖引起的浅基础办公楼和桩基础厂房的沉降情况。由于隧道开挖引起的应力释放, 建筑物基础的实测沉降随隧道的开挖而增加。距离隧道开挖距离近的位置沉降值较大, 距离开挖距离远的位置沉降值较小。桩基础厂房的沉降值都明显小于浅基础办公楼。而开挖近点的沉降值大于远点的沉降值, 最大可相差 2.8 倍。开挖初期浅基础的不均匀沉降量明显高于桩基础, 最大值可相差 6 倍。最终隧道开挖完成后, 桩基础的不均匀沉降量小于浅基础。

**关键词:** 隧道; 变形; 离心模型; 沉降

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0054-04

**作者简介:** 张宇亭(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程地基加固处理及试验监测方面的研究工作。

E-mail: tkszyt@163.com。

## Centrifugal model tests on settlement of structures caused by tunnel excavation

ZHANG Yu-ting, AN Xiao-yu, JIN Ya-fei

(Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, M.O.T., National Engineering Laboratory for Port Hydraulic Construction Technology, Tianjin 300456, China.)

**Abstract:** In the construction of underground tunnels, the route selection often inevitably leads to the situation of under-passing buildings. In order to ensure the safety and stability of the superstructures, it is necessary to control the settlement of the building foundation caused by the underpassing tunnel. In the construction of underpassing tunnel, the settlement changes of buildings with different foundation types are different. Through the three-dimensional centrifugal model tests, the settlements of shallow foundation office buildings and pile foundation workshop caused by the excavation of double-tube large tunnel are studied. Due to the stress release caused by tunnel excavation, the measured settlement of building foundation increases with tunnel excavation. The settlement value at the position close to the tunnel excavation is larger, and that at the position far from the excavation is smaller. The settlement value of pile foundation is obviously smaller than that of the shallow foundation buildings. However, the settlement value at the near point of excavation is greater than that at the far point, with a maximum difference of 2.8 times. At the initial stage of excavation, the differential settlement of the shallow foundation is obviously higher than that of the pile foundation, and the maximum value can be 6 times. After the tunnel excavation, the differential settlement of the pile foundation is less than that of the shallow foundation.

**Key words:** tunnel; deformation; centrifugal model; settlement

## 0 引言

近年来, 中国一些大中城市道路拥堵情况日益严重, 城市轨道交通方式越来越受到青睐。受到城市现状和发展规划影响, 隧道选线常不可避免的出现下穿建筑物的情况。为保证上部建筑物的安全稳定性, 控制下穿隧道引起的建筑物地基与基础的沉降, 常常成为工程建设的关键点。

根据不同的功能和地基条件, 建筑物一般采用浅

基础或深基础形式。当隧道下穿不同基础形式的建筑物时, 引起的地面沉降和建筑物变形必然不同, 需根据不同情况开展针对性的应对处理措施。

Peck<sup>[1]</sup>利用 Gauss 函数推导了用于预测隧道开挖引起地表沉降的经验公式, 并应用于相关的工程实践

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目 (TKS20220107)

收稿日期: 2022-12-01

中。孙曦源等<sup>[2]</sup>分析了地铁隧道下穿砌体结构建筑物时的基础沉降影响规律, 为工程提供了指导建议。刘学彦等<sup>[3]</sup>结合苏州轨道交通 2 号线下穿各类房屋建筑的案例, 给出了盾构施工的各项参数, 以控制地面沉降。

此外, 在新建隧道工程的施工中, 隧道开挖遇到既有桩基础的情况也不少见。学者们为确保桩承结构的长期使用性能, 进行了现场研究, 以探索隧道施工对现有桩的影响。例如, 隧道开挖引起的地面损失导致现有桩承载力降低<sup>[4]</sup>。由于隧道开挖, 桩底出现负摩阻力, 对桩的承载力产生不利影响<sup>[5]</sup>。通过在干砂中进行离心机试验, Jacobsz 等<sup>[6]</sup>确定了在现有桩基中产生较大沉降的影响区。由于在桩附近开挖隧道, Lee 等<sup>[7]</sup>发现端部承载力的降低导致桩沉降过大。基于离心试验结果, Ong<sup>[8]</sup>发现, 桩头约束条件对隧道施工引起的桩身附加弯矩和轴力有显著影响。

本文将结合实际工程, 针对盾构隧道同时下穿独立浅基础和桩基础厂房的情况, 开展离心模型试验, 对比分析差异性沉降, 评估盾构隧道施工的影响。

1 模型试验设计

本次试验在交通运输部天津水运工程科学研究院的 TK-C500 型土工离心机上进行, 离心机有效容量为 500 gt, 有效半径为 4.5 m, 最大加速度为 250g。

1.1 隧道开挖模拟装置

以往的离心模型试验中隧道开挖的实现通常采用排液法<sup>[9-11]</sup>。但是, 由于橡胶袋是由柔性材料制成的, 所以当离心加速度值增加时, 橡胶袋在土压力作用下呈椭圆形, 隧道截面与实际不符。另外, 还存在开挖速度难控、排液精度低等问题。为此, 本试验使用一种新型的隧道开挖模拟装置, 如图 1 所示。

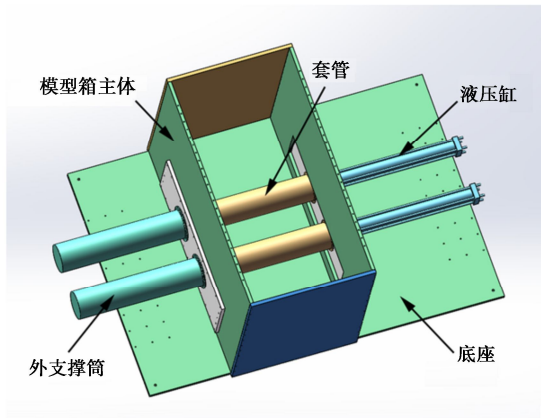


图 1 隧道开挖模拟装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simulation devices for tunnel excavation  
该装置由模型箱主体、液压缸、新建隧道、不锈

钢套管等部件组成。新建隧道位于不锈钢套管内, 试验中通过将套管推出模拟隧道开挖带来的地层损失, 同时还能模拟隧道连续开挖的过程。本文暂不考虑隧道施工过程中注浆、盾构机顶进等影响因素。

拟建工程位于长江下游, 跨江修建两条平行的大直径隧道, 隧道上方将穿越既有浅基础办公楼和桩基础厂房。在 75g 条件下, 新隧道的埋深和外径分别为 480, 207 mm, 对应原型分别为 36, 15.5 m, 两条隧道间的最净距离为 207 mm (1 倍洞径), 土壤最大厚度为 810 mm, 对应原型为 60.75 m。

1.2 试验材料

(1) 地基模型

拟建隧道工程场区土层主要由粉质黏土、细砂、砂质黏土和粗砂组成。试验将地基土层简化为两层粉质黏土层和两层砂土层。分别用福建标准砂和粉质黏土制备砂样和黏土样。通过三轴剪切试验和压缩试验, 确定砂土和粉质黏土的内摩擦角和压缩模量。试验中使用分层击实法和砂雨法制备地基模型, 地层参数如表 1 所示。

表 1 土体参数

Table 1 Parameters of soils

土层	厚度 /mm	重度 /(kN·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	压缩模量 /MPa
粉质黏土	217	18.8	3.2	22.8	8.2
砂土	200	19.5	0.0	36.0	10.9
粉质黏土	173	18.8	3.2	22.8	8.2
砂土	225	19.5	0.0	36.0	10.9

(2) 建筑物模型

浅基础办公楼的模型尺寸为 760 mm×93 mm×147 mm, 将基础上部荷载等效为 15 kN/m<sup>2</sup> 的均布荷载, 试验中简化为钢板; 将柱下独立基础简化为条形基础, 由铝管和钢板制成。

桩基础厂房的模型尺寸为 600 mm×267 mm×240 mm, 将基础上部荷载等效为 5 kN/m<sup>2</sup> 的均布荷载, 试验中简化为铝板; 原型为 14 m×0.55 m×0.55 m 的预制方桩, 则采用刚度比尺关系进行换算, 使用铝合金管模拟。

1.3 试验工况及监测方案

(1) 试验工况

试验工况和主要物理量相似比尺分别见表 2, 3, 典型试验模型布置如图 2 所示。

表 2 土工离心试验工况

Table 2 Design schemes for centrifugal model tests

试验编号	建筑物类型	荷载 /(kN·m <sup>-2</sup> )	基础形式
J1	办公楼	15	浅基础
J2	厂房	5	桩基础

表 3 土工离心试验相似比尺

Table 3 Scaling laws of centrifugal model tests			
物理参数	相似比	物理参数	相似比
加速度	$N$	密度	1
长度/位移	$1/N$	质量	$1/N^3$
应力	1	抗弯刚度	$1/N^3$

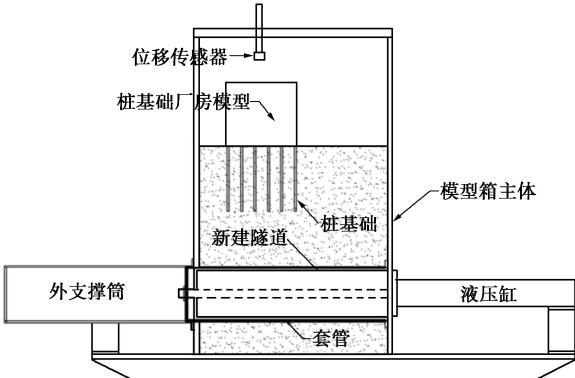


图 2 J2 土工离心试验模型结构

Fig. 2 Model structure of centrifugal test J2

(2) 监测方案

每组试验安装 2 个激光位移传感器，用来观测隧道开挖过程中建筑物的沉降情况。激光传感器为松下 HGC1050，精度为 0.02 mm，具体布置如图 3 所示。

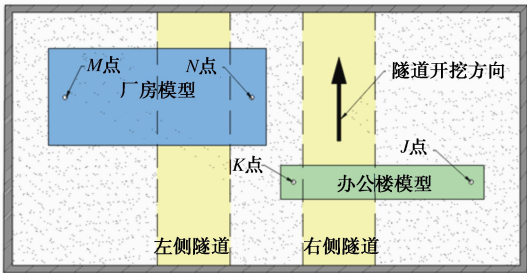


图 3 传感器布置图

Fig. 3 Layout of sensors

2 离心试验结果分析

2.1 浅基础办公楼模型试验

图 4 为浅基础办公楼不同位置处的沉降曲线，可以看出，整个隧道开挖过程中，建筑物基础的沉降逐渐增大。在右侧隧道开挖过程中，距离隧道较近的 K 点沉降量较大，约是远处测点 J 的两倍；而左侧隧道由于距离建筑物相对较远，开挖对建筑物的影响相对较弱。K 点的最大沉降量为 2.16 cm，J 点的最大沉降量为 1.44 cm，沿建筑物长度方向的不均匀沉降差约为 0.72 cm。

2.2 桩基础厂房模型试验

图 5 为桩基础厂房不同位置处的沉降曲线，可以看出，整个隧道开挖过程中，建筑物基础的沉降逐渐增大。由于建筑物距右侧隧道的距离较远，在右侧隧道开挖过程中，M 点和 N 点的沉降量很小，当左侧隧

道开挖时，测点 M，N 的沉降迅速增大，N 点由于距离左侧隧道更近，沉降量更大。N 点的最大沉降量为 1.31 cm，M 点的最大沉降量为 0.77 cm，施工结束后沿车间长度方向的不均匀沉降差约为 0.54 cm。

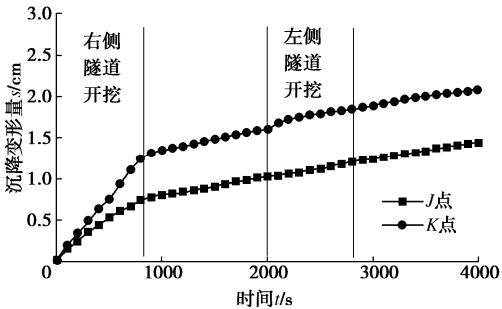


图 4 浅基础办公楼实测沉降曲线

Fig. 4 Curves of measured settlement of office buildings

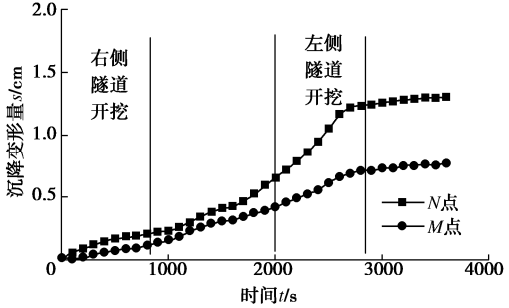


图 5 厂房实测沉降曲线

Fig. 5 Curves of measured settlement of factory buildings

2.3 远、近点开挖过程沉降对比

图 6，7 分别显示了隧道开挖过程中，距离隧道近

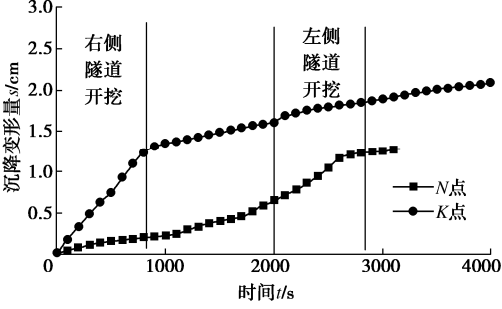


图 6 距离隧道开挖近点的建筑物监测点实测沉降曲线

Fig. 6 Curves of measured settlement of buildings at monitoring point near point of tunnel excavation

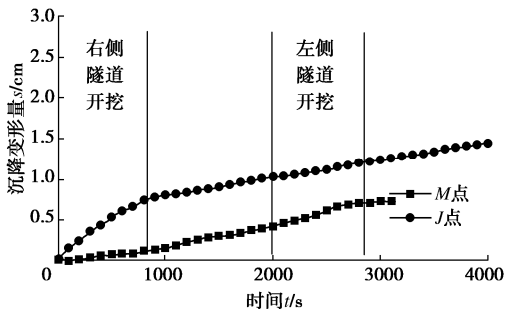


图 7 距离隧道开挖远点的建筑物监测点实测沉降曲线

Fig. 7 Curves of measured settlement of buildings at monitoring point far from tunnel excavation

点和远点的建筑物监测点的沉降变化情况。由图中可以看出, 无论是近点还是远点, 桩基础厂房的沉降值都明显小于浅基础办公楼。而开挖近点的沉降值大于远点的沉降值, 最大可相差 2.8 倍。

## 2.4 最大不均匀沉降量对比

图 8 显示了办公楼和厂房在隧道开挖过程中, 监测远点和近点的不均匀沉降差值。可以看出, 在隧道开挖过程中, 开挖初期浅基础的不均匀沉降量明显高于桩基础, 最大值可相差 6 倍。最终隧道开挖完成后, 桩基础的不均匀沉降量小于浅基础。

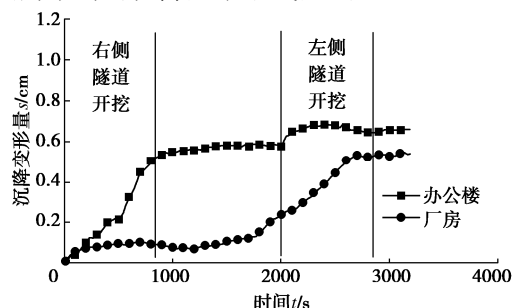


图 8 不同基础型式建筑物不均匀沉降量

Fig. 8 Differential settlements of buildings with different foundation types

## 3 结 论

通过三维离心模型试验, 研究了双管大型隧道开挖对浅基础办公楼和桩基础厂房引起沉降的影响。根据试验结果, 可以得出 3 点结论。

(1) 由于隧道开挖引起的应力释放, 建筑物基础的实测沉降随隧道的开挖而增加。距离隧道开挖距离近的位置沉降值较大, 反之则较小。

(2) 监测点距离隧道开挖位置无论是近点还是远点, 桩基础厂房的沉降值都明显小于浅基础办公楼。而开挖近点的沉降值大于远点的沉降值, 最大可相差 2.8 倍。

(3) 在隧道开挖过程中, 开挖初期浅基础的不均匀沉降量明显高于桩基础, 最大值可相差 6 倍。最终隧道开挖完成后, 桩基础的不均匀沉降量小于浅基础。这说明桩基础厂房由于基础深度较大, 桩土间的相互作用减小了下部隧道开挖的影响。

## 参考文献:

- [1] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proc of 7th ICSMFE. Mexico, 1969.
- [2] 孙曦源, 衡朝阳, 周 智. 北京地铁隧道下穿砌体结构建筑物诱发基础沉降规律实测研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊 2): 304 - 308. (SUN Xi-yuan, HENG Chao-yang,

ZHOU Zhi. An actual measurement research on building foundation settlement induced by under-crossing metro tunnel in Beijing[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S2): 304 - 308. (in Chinese))

- [3] 刘学彦, 袁大军, 乔国刚, 等. 盾构长距离穿越房屋安全技术研究[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(2): 147 - 151. (LIU Xue-yan, YUAN Da-jun, QIAO Guo-gang, et al. Safe shield tunnelling under buildings[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(2): 147 - 151. (in Chinese))
- [4] 宫全美, 张润来, 余 杰, 等. 桩底盾构施工引起的桩基承载力损失计算[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(10): 1384 - 1391. (GONG Quan-mei, ZHANG Run-lai, YU Jie, et al. Calculating method of pile bearing capacity loss induced by the tunnel excavation underneath the pile[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2018, 46(10): 1384 - 1391. (in Chinese))
- [5] 杨晓杰, 邓飞皇, 聂 雯, 等. 地铁隧道近距穿越施工对桩基承载力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1290 - 1295. (YANG Xiao-jie, DENG Fei-huang, NIE Wen, et al. Study on effect of metro tunneling on carrying capacity of pile foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(6): 1290 - 1295. (in Chinese))
- [6] JACOBSZ S W, STANDING J R, MAIR R J, et al. Centrifuge modelling of tunnelling near driven piles[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(1): 49 - 56.
- [7] CHIANG K H, LEE C J. Responses of single piles to tunneling-induced soil movements in sandy ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(10): 1224 - 1241.
- [8] ONG C W. Centrifuge Model Study of Tunnel-Soil-Pile Interaction in Soft Clay[D]. Singapore: National University of Singapore, 2009.
- [9] MARSHALL A M, MAIR R J. Tunneling beneath driven or jacked end-bearing piles in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(12): 1757 - 1771.
- [10] NG C W W, LU H. Effects of the construction sequence of twin tunnels at different depths on an existing pile[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, 51(2): 173 - 183.
- [11] 张宇亭. 水平循环荷载作用下群桩与软黏土相互作用离心模型试验研究[J]. 水道港口, 2018, 39(2): 211 - 216. (ZHANG Yu-ting. Centrifuge modeling of pile group response due to lateral cyclic loading in soft clay[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2018, 39(2): 211 - 216. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)