

XDOI: 10.16285/j.rsm.2015.11.022

# 新建工程基坑开挖及结构施工对既建下卧隧道的影晌研究

徐长节<sup>1,2</sup>, 王伊丽<sup>2</sup>, 徐芑蕾<sup>3</sup>, 王金昌<sup>4</sup>

(1. 华东交通大学 土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 浙江大学 城市与滨海岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058;  
3. 浙江省建筑科学设计研究院有限公司, 浙江 杭州 330013; 4. 浙江大学 交通工程研究所, 浙江 杭州 310058)

**摘 要:** 随着城市建设的发展, 地面工程和地下工程交叉建设的情况越来越多, 新建工程对既有建筑产生影响的情况不可避免。因此, 在保证既有工程结构安全的前提下建设新的工程已成为众多学者关注的重要问题之一。针对某已建隧道上方工程建设, 分别采用 Abaqus 有限元数值模拟分析法和简化的规范角点法进行对比分析, 评价隧道上方工程的基坑开挖及后续的结构施工对既建下卧公路隧道的影晌。实施过程中的现场监测数据表明数值分析法和传统的土力学理论法在此类施工边界清晰、荷载施加明确的工程中的有效性并保障了工程的安全。研究还表明, 二维分析模型不仅分析计算工作量相对较小, 相较于考虑三维的实际工程安全性更有保障。本工程的成功经验可为类似工程的设计和施工提供有益的工程参考和借鉴。

**关 键 词:** 基坑开挖; 已建隧道; 新建工程; 数值分析; 规范角点法

中图分类号: TV 551.4+2

文献识别码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 11-3201-09

## Effect of foundation pit excavation and structural construction of new engineering on existing underlying tunnel

XU Chang-jie<sup>1,2</sup>, WANG Yi-li<sup>2</sup>, XU Yuan-lei<sup>3</sup>, WANG Jin-chang<sup>4</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China;  
2. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;  
3. Zhejiang Academy of Building Research & Design Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310013, China;  
4. Institute of Transportation Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

**Abstract:** With the development of city construction, it is common to see more and more cross construction phenomena of the ground engineering and the underground engineering, which unavoidably contributes to the effect of the new construction on the existing construction. Therefore, on the premise of ensuring the safety of the existing construction, how to construct new projects has become one of the important issues for numerous scholars. In this paper, the finite element numerical simulation analysis method of ABAQUS and the simplified specification corner-points method are applied to analyze comparatively an engineering construction adjacent to the existing underlying tunnel. On this basis, the effects of the pit excavation and its subsequent construction on the underlying existing tunnel are evaluated. The field monitoring data demonstrate that the two methods, i.e. the numerical analysis method and the traditional theory of soil mechanics method, are coincidentally available in such engineering construction which has clear boundary and explicit load and can secure engineering. The research also shows that the two-dimensional analysis model not only has the smaller calculation workload, but also has more security compared with a three-dimensional model considering practical engineering conditions.

**Keywords:** foundation pit excavation; built tunnel; new engineering; numerical analysis; specification corner-points method

## 1 引 言

近年来, 随着建设用地的日趋紧张, 邻近工程

之间相互影响的案例屡见不鲜, 最为典型的的就是基坑工程施工对邻近工程, 如隧道 (包括铁路隧道、公路隧道、人防隧道等) 的影晌作用: 基坑开挖和

收稿日期: 2014-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51278449, No.51238009, No.51338009); 杭州建委科技项目 (No.2010391)。

Foundation item: Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos.51278449, 51238009 and 51338009) and Hangzhou Urban And Rural Construction Committee (Grant No.2010391).

第一作者简介: 徐长节, 男, 1972 生, 教授, 博导, 主要从事土动力学、基坑围护等方面的研究工作。E-mail: xucj@zju.edu.cn

后续的结构施工引起土体中应力重分布, 从而对隧道产生附加的应力与位移<sup>[1-2]</sup>。

鉴于此, 如何从定性与定量的角度来评估基坑开挖及后续的结构施工对于既建运营隧道安全性的影响具有重大意义。对于这一重大课题, 众多国内外学者对其解析解进行了研究。陈郁等<sup>[3]</sup>结合 Mindlin 经典弹性理论解和弹性地基梁理论, 不仅推导出由于基坑开挖引起临近隧道结构的附加应力并同时计算出隧道隆起量。刘国彬等<sup>[4]</sup>建立了预测下卧隧道竖向变形的坑底隆起变形计算模型, 研究了控制基坑下卧盾构隧道竖向变形的的方法。杨栋<sup>[5]</sup>通过结合弹性力学基本方程、love 位移函数和 Hankel 积分变换理论, 分析获得弹性半空间体应力与位移的解析解, 来分析基坑开挖引起的周围土体位移场变化和由于基坑开挖造成地铁盾构隧道的变形。蒋洪胜等<sup>[6]</sup>通过对比隧道变形的现场监测结果和开挖基坑周围土体位移场的理论分析, 分别从隧道的垂直沉降、水平移动以及横向变形等角度讨论了基坑开挖对临近地铁隧道的影响。吉茂杰等<sup>[7]</sup>结合时间、空间效应, 研究了临近软土基坑地铁隧道的位移变化规律, 并考虑基坑工程施工影响, 推导出隧道位移变形的实用计算方法。

然而, 解析方法在求解复杂模型问题时, 往往遇到困难, 因此, 目前众多学者更趋向于采用数值模拟方法来解决这类问题<sup>[8]</sup>。王卫东等<sup>[8]</sup>采用数值模型模拟施工工况, 分析了深基坑开挖过程中开挖卸载对临近地铁隧道的影响。高盟等<sup>[9]</sup>采用 FLAC-3D 建立三维模型模拟开挖紧邻上海某地铁站的工程基坑, 对比有限元分析与现场检测数据, 详细讨论了设置托换桩、搅拌桩加固、分块开挖等控制车站变形的有效措施。戚科骏等<sup>[10]</sup>采用 Plaxis 有限元软件模拟了上海某一临近地铁隧道深基坑开挖的不同阶段和不同施工方案, 总结了不同施工方式对结构物产生的不同影响。徐长节等<sup>[11]</sup>运用 Plaxis 有限元软件对相邻隧道受基坑施工的影响进行了数值分析研究, 分析表明, 采取加强有关围护结构刚度以及分块对称开挖等措施能显著控制已建隧道的变形, 同时说明在基坑开挖前对其对邻近地下建筑物的影响进行预研是十分必要的。郑刚等<sup>[12]</sup>以紧邻已运营天津地铁 1 号线既有隧道箱体上方的西青道下沉隧道基坑工程为背景, 采用 ABAQUS 软件对基坑的实际施工过程进行动态模拟, 结合现场实测数据, 分析并讨论及时有效的隧道保护措施。

对于复杂的岩土工程问题, 无论是传统解析方法还是数值模拟方法都具有自身的优越性与局限性。本文以某工程实例为背景, 在此基础上结合采用 ABAQUS 有限元数值模拟分析法和简化的规范角点法研究某拟建房建工程对既建下卧某公路隧道的影响, 计算并分析了新建工程基坑开挖及结构施工对既建下卧公路隧道的应力和变形的影响, 并与现场监测数据对比, 二者结果较为一致, 验证了本文数值分析和理论分析的正确性, 研究方法和结论可为类似工程提供借鉴。

## 2 工程概况及地质条件

### 2.1 工程概况

拟建项目场地地貌单元属丘陵地带, 位于半山腰处, 最高海拔约为 90 m, 场地现已平整, 高程在 57.30~58.42 m 之间。本工程总用地面积为 7 681 m<sup>2</sup>, 建筑占地面积为 1 600 m<sup>2</sup>, 地上总建筑面积为 4 462 m<sup>2</sup>, 附设地下室一层, 建筑面积为 3 030 m<sup>2</sup>。拟建物主要为物资储藏室及文化活动现场、1#设备用房、2#设备用房、会议室、1#档案楼和 2#档案楼, 层数均为 3 层, 框架结构。山脚下有一既建公路隧道, 南北走向, 建成至今 10 余年。隧道为两座单向双车道隧道, 两隧道净间距 30 m, 其中东线隧道长 825 m, 西线隧道长 772 m, 两座隧道共长 1 597 m。隧道净高 5.0 m, 净空面积 63.445 m<sup>2</sup>。

两者平面位置关系如图 1 所示, 两者空间剖面关系如图 2 所示。

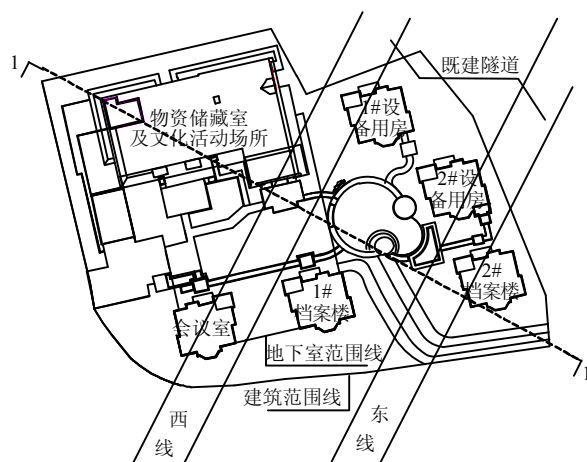


图 1 拟建建设工程与既建下卧隧道平面示意图  
Fig.1 Plane diagram of the proposed construction project and the existing underlying tunnel

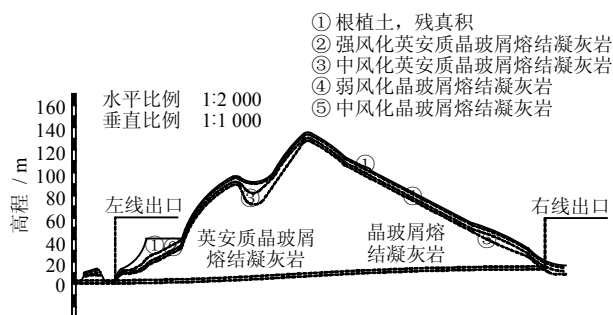


图 2 拟建建设工程与既建下卧隧道(西线)剖面示意图

Fig.2 Sketch map of the proposed construction project and the existing underlying tunnel(the west line)

隧道按新奥法 (NATM) 原则采用复合式衬砌。初期支护以锚杆、钢筋网、喷混凝土组成联合支护体系, 二次衬砌采用模筑混凝土衬砌, 初期支护与二次衬砌之间设防水夹层。其中: V~VI类围岩二次衬砌混凝土为 30 cm 厚 25 号模筑混凝土, III类围岩二次衬砌为 35 cm 厚带仰拱模筑混凝土。设计速度为 50 km/h; 根据行车荷载等级, 洞内路面采用厚 24 cm 的 C35 水泥混凝土路面。

现场照片见图 3:

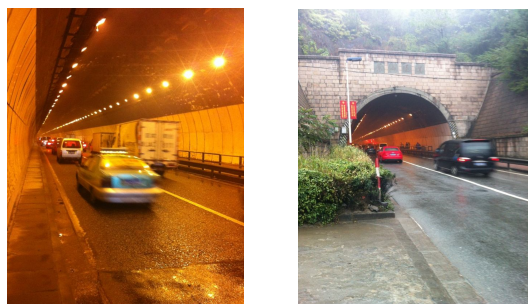


图 3 现场照片

Fig.3 Site Photos

## 2.2 工程地质条件

### 2.2.1 地层结构

根据该建设工程勘察深度范围内揭露的地层, 可将场地地基土划分为 3 个工程地质层, 其分布及力学参数取自该工程实例的工程地质勘察报告, 具体见表 1。

表 1 土层参数表

Table 1 Table of soil parameters

|            | 土层厚度     | 重度 $\gamma$            | 压缩模量               | 黏聚力 $c$ | 内摩擦角 $\varphi$ |
|------------|----------|------------------------|--------------------|---------|----------------|
|            | / m      | / (kN/m <sup>3</sup> ) | $E_s$ / MPa        | / kPa   | / (°)          |
| ① 0 素填土    | 0.5~1.7  | 18.0                   | 5.3                | 5.0     | 20.3           |
| ⑨ 含角砾黏性土   | 3.1~19.1 | 18.9                   | 4.8                | 12.4    | 21.5           |
| ⑩ 3 中风化凝灰岩 | 3.0~5.4  | 22.1                   | $30.5 \times 10^3$ | 2.1     | 75.0           |

根据该工程地质勘察报告, 该隧道所处地层均为中生界上侏罗系上统西山头组成, 岩性为晶屑熔结凝灰岩, 岩性除风化层外, 致密坚硬, 节理发育。勘察范围内有 3 条不同产状和规模的断层, 其中 F2 断层与隧道成  $40^\circ$  相交, 宽 1~10 m, 倾角  $85^\circ$ , 为张扭性正断层, 强烈破碎; F1 与 F2 断层于洞口与轴线相交, 但未伸入洞内。

### 2.2.2 场地水文地质情况

地下水不发育, 主要以第四系松散孔隙水和基岩裂隙水形式存在, 水量贫乏。总体而言, 地下水活动对围岩稳定性影响不大。

### 2.2.3 场地类别及不良地质作用

按《建筑抗震设计规范》<sup>[13]</sup>和勘察资料报告等综合判定拟建场地类别为 II 类, 场地稳定性类别为稳定, 工程地质条件简单, 无动力地质作用的破坏影响, 且隧道所在区域为地震基本稳定区, 地震基本烈度为 VI 度, 故本工程未见有明显不良影响的地质作用存在, 较适宜拟建物建设。

## 3 有限元模拟分析

### 3.1 概述

为评价该项工程基坑开挖及后续的结构施工对既建隧道的影响, 采用切合实际工程、适合复杂工况的 ABAQUS 作为有限元分析软件进行数值分析。

#### 3.1.1 计算模型简化

选取隧道顶部距待建房屋底部最近距离的剖面 (如图 1 所示剖面 1-1), 简化为平面应变问题进行分析。在计算模型尺寸选取时, 充分考虑了基坑开挖的深度、开挖基坑的大小及与既建公路隧道距离等工程影响范围, 模型大小取为  $284 \text{ m} \times 86 \text{ m}$ , 如图 4 所示。

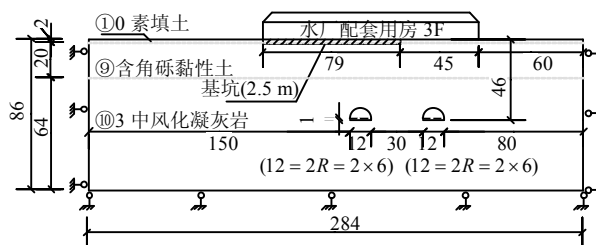


图 4 有限元计算模型简化图(单位: m)

Fig.4 Simplified graph of finite element calculation model (unit: m)

新建工程基坑开挖深度约为 2.5 m, 拟建建筑物用房均为 3 层, 根据《建筑结构荷载规范》<sup>[14]</sup>, 框架结构每层荷载约为 15 kPa, 对地面产生荷载为

15 kPa $\times$ 3=45 kPa, 考虑到实际环境的复杂性以及后期地面填土, 取安全系数  $K=1.78$ , 则荷载为 80 kPa。基坑开挖所在土层为素填土和含角砾黏性土, 土体重度为 19 kN/m<sup>3</sup>, 挖土后卸载 19 kN/m<sup>3</sup> $\times$ 2.5 m=47.5 kPa, 与新建工程所产生的荷载相叠加, 最终对地表作用荷载为 32.5 kPa。

### 3.1.2 材料参数选取

假定同一土层中的土是均匀的、连续的、各向同性的, 考虑土体非线性的应力-应变关系, 将其视为理想弹塑性体, 采用线性 Drucker-Prager (简称 D-P) 本构模型, 来优化复合新建工程基坑开挖及结构施工对土体受压状态的模拟, 并由室内试验获得的 Mohr-Coulomb 模型参数  $c$ ,  $\varphi$  转化获得线性 D-P 模型参数  $\beta$ ,  $d$ , 见表 2。

表 2 土层 D-P 模型参数  
Table 2 D-P model parameters of the soil layer

|            | 黏聚力 $C$<br>/ kPa | 内摩擦角 $\varphi$<br>/ (°) | 摩擦角 $\beta$<br>/ (°) | $d/c$ | $d$   |
|------------|------------------|-------------------------|----------------------|-------|-------|
| ① 0 素填土    | 5.00             | 20.3                    | 30.5                 | 1.59  | 7.96  |
| ② 含角砾黏性土   | 12.40            | 21.5                    | 38.0                 | 1.48  | 18.35 |
| ③ 3 中风化凝灰岩 | 0.42             | 60.0                    | 53.3                 | 0.77  | 0.33  |

注: ① 考虑相关流动时把 Mohr-Coulomb 模型参数  $c$ ,  $\varphi$  转化为 D-P 模型参数  $\beta$ ,  $d$ , 其公式为:  $\tan \beta = \sqrt{3} \sin \varphi / \sqrt{1 + (1/3) \sin^2 \varphi}$ ,  $d/c = \sqrt{3} \cos \varphi / \sqrt{1 + (1/3) \sin^2 \varphi}$ 。

② 极据《建筑边坡工程技术规范》<sup>[15]</sup>, 取岩石黏聚力折减系数 0.2 和岩石内摩擦角折减系数 0.8 获得修正的岩石黏聚力和岩石内摩擦角列于表中。

线性 D-P 本构模型<sup>[16]</sup> (见图 5) 在  $\pi$  平面上的屈服面不是圆形, 以此来真实地反映不同的三轴拉伸和压缩屈服强度、 $\pi$  平面上的塑性流动以及不同的摩擦角和剪胀角, 其屈服准则为

$$F = t - p \tan \beta - d = 0 \quad (1)$$

式中:  $t$  为偏应力参数;  $\beta$  为 D-P 模型摩擦角, 即线性屈服轨迹在  $p$ - $t$  应力平面上的倾角;  $d$  为 D-P 模型黏聚力。

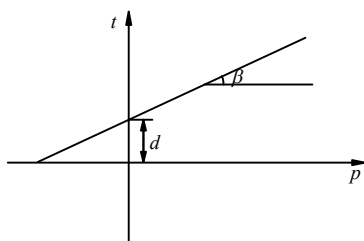


图 5 线性 D-P 模型子午面上的屈服轨迹<sup>[16]</sup>

Fig.5 Yield locus of linear D-P model on the meridian plane

### 3.1.3 分析步骤

Step-1: 初始地应力平衡。

Step-2: 隧道开挖; 以考虑衬砌的初始应力、应变状态, 便于与施工完毕后的衬砌应力、应变状态相比较。

Step-3: 新建工程基坑开挖, 由于土质较好, 采用放坡开挖, 一次性开挖到底, 深度为 2.5 m, 卸载为 47.5 kPa。

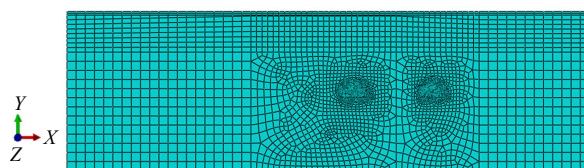
Step-4: 新建工程结构施工, 以地面加载 80 kPa 来实现对该工况的模拟。

### 3.1.4 边界及荷载条件

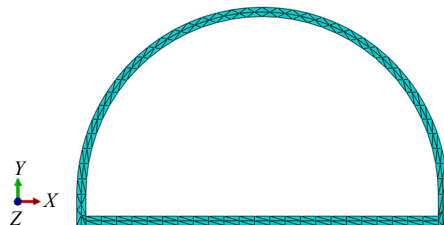
限定模型两侧的水平位移和模型底部两个方向的位移。设计单位明确: 在新建工程范围内, 基坑开挖相当于卸载 47.5 kPa, 工程竣工后施工荷载约为 80 kPa。

### 3.1.5 网格划分

山体模型最小网格为 0.5 m (围岩附近), 采用 CPE4 单元, 最大网格为 3 m; 隧道模型网格为 0.5 m, 采用 CPE4I 单元 (以精确模拟衬砌单元的弯曲变形模式), 见图 6。



(a) 山体部分



(b) 衬砌部分

图 6 山体部分及衬砌部分网格划分

Fig.6 Mesh generation of the mountain and the lining

## 3.2 有限元计算结果及分析

根据该房建工程施工不同时间段对隧道产生不同程度的影响, 定义以时间段为划分依据的 3 个工况, 分别为: 0 为隧道建成时工况 (初始平衡状态)、1 为基坑开挖后工况、2 为工程建成后工况。

### 3.2.1 初始地应力平衡

径向位移在  $10^{-16}$  数量级 ( $10^{-7} \sim 10^{-8}$  为最大可接受地应力平衡结果), 平衡结果理想。

### 3.2.2 应力和径向位移结果及分析

利用 ABAQUS 有限元软件对工程施工进行动态模拟, 对衬砌建立圆弧局部坐标系, 1 方向为径

向, 2 方向为圆弧切线方向, 以 S22 表示隧道衬砌沿圆弧正截面上的应力, U2 表示隧道衬砌沿圆弧的径向位移, 获得不同工况条件下应力和径向位移的数值结果。只取最大值进行统计, 结果如表 3 所示。

表 3 不同工况下应力与径向位移计算结果统计

Table 3 Summarization of stress and radial displacement calculation results under different working conditions

| 工况         | 西线隧道                        |                           | 东线隧道                        |                           |
|------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|            | S22 <sub>max</sub><br>/ MPa | U2 <sub>max</sub><br>/ mm | S22 <sub>max</sub><br>/ MPa | U2 <sub>max</sub><br>/ mm |
| 工况 0—隧道建成后 | 7.5                         | 2.2                       | 7.5                         | 2.2                       |
| 工况 1—基坑开挖后 | 7.0                         | 1.7                       | 7.3                         | 2.0                       |
| 工况 2—工程建成后 | 8.5                         | 3.7                       | 8.4                         | 3.3                       |

限于篇幅, 本文选取相对不利的西线隧道进行详细的有限元模拟数值分析。

由图 7 可知, 隧道建成的初始平衡状态作为工况 0, 此时西线隧道衬砌最大压应力约为 7.5 MPa, 位于拱角处, 且衬砌内部未出现拉应力, 符合岩石抗压强度远优于抗拉强度的力学性能。基坑开挖 2.5 m (工况 1) 时, 相当于土体卸载约 47.5 kPa, 相较于开挖前, 西线隧道衬砌的应力状态改变可忽略。待工程建成后 (工况 2), 隧道衬砌最大压应力约 8.5 MPa, 较隧道建成后的最大压应力增大 1.0 MPa, 增幅约 13.3%, 但仍小于 C25 混凝土抗压强度设计值 11.9 MPa。可见水厂配套用房建成后对隧道衬砌确有一定影响, 但影响较小。

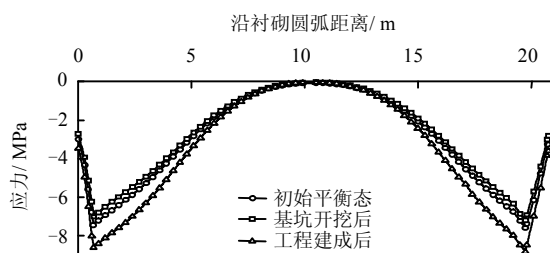


图 7 应力沿衬砌圆弧变化曲线(西线)  
Fig.7 Curves of stress along the arc axis(the west tunnel)

由图 8 可知, 隧道衬砌的最大径向位移发生在拱顶, 即拱顶竖向位移, 在隧道建成工况 0 (初始平衡状态) 下约为 2.20 mm, 基坑开挖后工况 1 与工程建成后工况 2 时拱顶位移分别约 1.7 mm 和 3.7 mm, 较基坑开挖前分别减小了 0.5 mm 和增加 1.5 mm。按照规范《公路隧道设计规范》<sup>[17]</sup>: 按 III 级围岩, 拱顶下沉允许值为隧道宽带的 0.1%~0.3%, 即 12~36 mm。可见, 基坑开挖和工程建设

对隧道径向位移均有影响, 但较小, 可忽略不计。

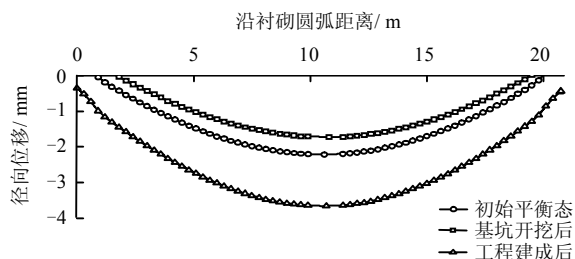


图 8 径向位移沿衬砌圆弧变化曲线(西线)  
Fig.8 Curves of radial displacement along the arc axis(the west tunnel)

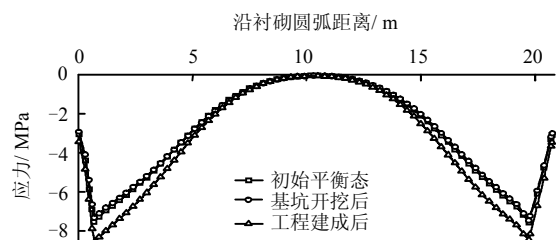


图 9 应力沿衬砌圆弧变化曲线(东线)  
Fig.9 Curves of stress along the arc axis(the east tunnel)

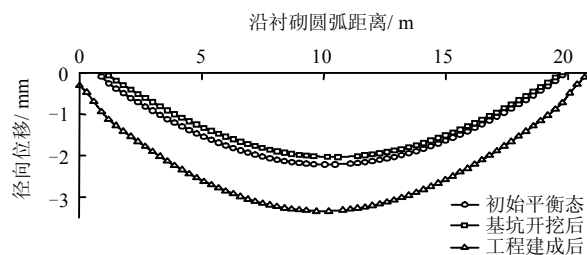


图 10 径向位移沿衬砌圆弧变化曲线(东线)  
Fig.10 Curves of the radial displacement along the arc axis(the east tunnel)

图 9 和图 10 分别为东线隧道应力和径向位移沿衬砌圆弧变化曲线, 同理可以分析得到和西线隧道类似的结论, 即新建工程的基坑开挖和工程建设对隧道衬砌和径向位移均有一定影响, 但较小。

综合上述有限元分析, 可得到以下两点结论性意见:

(1) 整个施工过程对衬砌内力产生的影响较小, 西线隧道内力增幅约 13.3%, 东线隧道内力增幅约 12%, 最大压应力小于衬砌混凝土抗压强度设计值, 完全在安全范围内。

(2) 工程建成后, 西线隧道拱顶径向位移增大 1.5 mm, 东线隧道拱顶径向位移增大 1.6 mm, 位移增量很小, 总量均在设计规范允许范围之内。

以上 ABAQUS 数值模拟结果证明该工程建设

是安全可行的。

## 4 土力学理论计算分析

### 4.1 概述

ABAQUS 有限元软件从数值分析的角度验证了该工程的可行性与实施性,为进一步论证,从传统的土力学角度考虑,在陈郁等<sup>[3]</sup>结合 Mindlin 经典弹性理论解推导出由于基坑开挖引起隧道结构的附加应力的基础上,按照《建筑地基基础设计规范》<sup>[18]</sup>,利用简化的规范角点法计算矩形面积上均布荷载作用下土体产生的附加应力,即

$$\sigma_z = K_z P \quad (2)$$

式中:  $\sigma_z$  为扩散距离为  $z$  时地基中附加应力;  $K_z$  为附加应力系数;  $P$  为矩形均布荷载密度。

根据隧道剖面图,隧道顶部黄海高程约为 19 m,待建工程区域目前的黄海高程约为 57.5 m,二者距离  $z = 38.5$  m,即附加应力扩散距离。故土力学传统理论计算模型可以简化为,在含有地下室部分大小 41 m×58 m 的矩形荷载和 3 个拟建用房 11 m×14 m 的矩形荷载作用下,土体附加应力扩散距离  $z = 38.5$  m 处附加应力的计算。计算附加应力平面简化图形如图 11 所示。

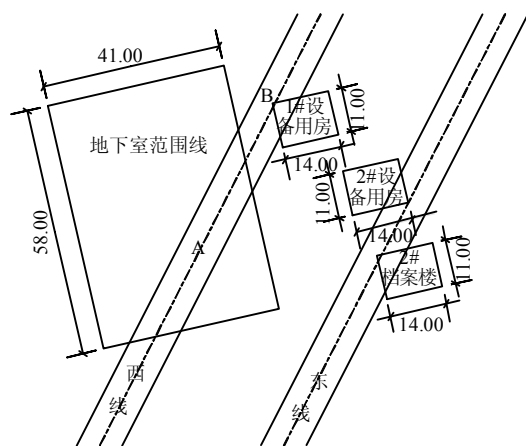


图 11 附加应力计算平面简图(单位: m)  
Fig.11 Calculating plane diagram of additional stress (unit: mm)

根据附加应力扩散规律,隧道顶部受到的最大附加应力区域可能位于西侧隧道轴线与地下室相交中部 A,或西侧隧道轴线与 1#设备用房相交的 B,亦或东侧隧道轴线与 2#设备用房和 2#档案楼连线的交点 C。因此,分别求出区域 A、B、C 3 处的附加应力,便可得由于基坑开挖引起的最大附加应力。

### 4.2 区域 A、B、C 受到的附加应力

限于篇幅,选取附加应力最大的相对不利点的

区域 B 作为具体的简化规范角点法进行应力计算。

#### 4.2.1 B 点受到的附加应力

(1) 西线隧道顶部区域 B 的附加应力计算简图如图 12~14 所示。

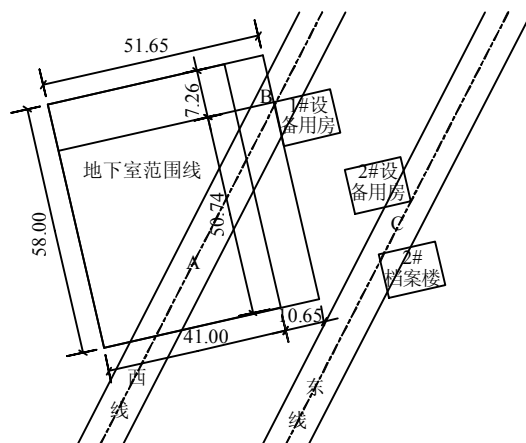


图 12 地下室传至区域 B 的计算简图(单位: m)  
Fig.12 Calculation diagram of additional stress from basement to area B (unit: m)

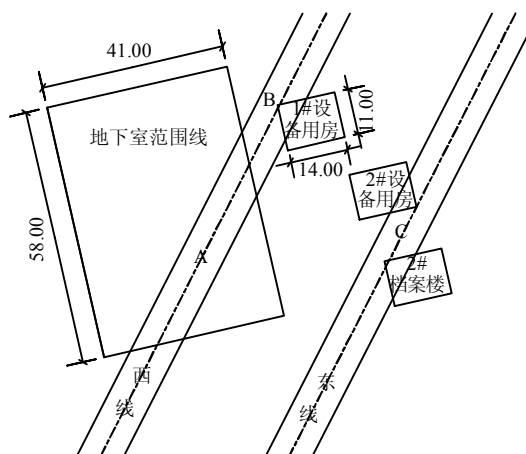


图 13 1#设备间传至区域 B 的计算简图(单位: m)  
Fig.13 Calculation diagram of additional stress from No.1 equipment room to area B (unit: m)

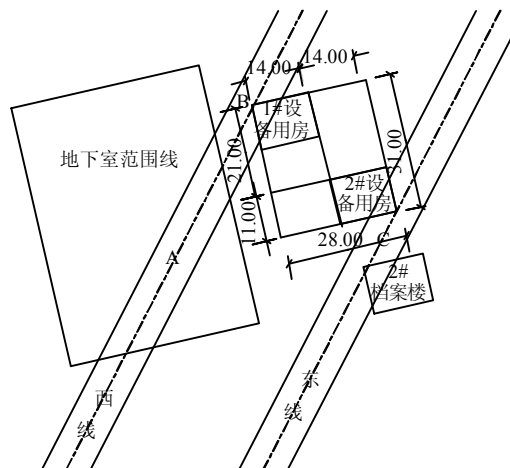


图 14 2#设备间传至区域 B 的附加应力计算简图(单位: m)  
Fig.14 Calculation diagram of additional stress from No.2 equipment room to area B (unit: m)

(2) 根据  $L/B$  与  $Z/B$  的值查《建筑地基基础设计规范》<sup>[18]</sup> “矩形面积上均布荷载作用下角点的平均附加应力系数  $K_z$ ”，并乘以地面矩形均布荷载密度  $P=32.5\text{ kPa}$ ，计算结果如下：

由表 4 中 2#设备间传递到区域 B 的附加应力为 1 kPa，可知，2#档案楼由于距离 B 更远，其对区域 B 的影响数值将更小，可忽略不计。

所以，可得西线隧道顶部 B 点受到的总附加应力约为  $3.552+19.880+1.000\text{ kPa}=24.432\text{ kPa}$

表 4 西线隧道顶部区域 B 的附加应力计算  
Table 4 Calculated additional stress of roof area B in west tunnel

| 区域     | 矩形面积   |        | $L/B$   | $Z/B$ | 平均附加应力系数 | 附加应力 /kPa | $\Sigma$ /kPa |
|--------|--------|--------|---------|-------|----------|-----------|---------------|
|        | $L$ /m | $B$ /m |         |       |          |           |               |
| 地下室范围  | 51.65  | 7.26   | 7.114 3 | 5.303 | 0.129 3  | 4.202 3   | 3.552         |
|        | 51.65  | 50.74  | 1.017 9 | 0.759 | 0.239 5  | 7.783 8   |               |
|        | 50.74  | 10.65  | 4.764 3 | 3.615 | 0.157 5  | -5.118 8  |               |
|        | 10.65  | 7.26   | 1.466 9 | 5.303 | 0.102 0  | -3.315 0  |               |
| 1#设备用房 | 14.00  | 11.00  | 1.273 0 | 3.500 | 0.248 5  | 19.880 0  | 19.880        |
| 2#设备用房 | 31.00  | 28.00  | 1.107 1 | 1.375 | 0.216 5  | 17.320 0  | 1.000         |
|        | 28.00  | 20.00  | 1.400 0 | 1.925 | 0.190 5  | -15.240 0 |               |
|        | 31.00  | 14.00  | 2.214 3 | 2.750 | 0.173 0  | -13.840 0 |               |
|        | 20.00  | 14.00  | 1.428 6 | 2.750 | 0.159 5  | 12.760 0  |               |

注：L 和 B 分别表示该建筑物用地为简化矩形时，该矩形的长和宽。

4.2.2 区域 A、B、C 附加应力计算

同理利用规范角点法可以求得区域 A 和 C 的附加应力，3 个区域的附加应力汇总表如表 5 所示。

表 5 区域 A、B、C 附加应力汇总  
Table 5 Additional stress summarization of areas A, B, C

| 区域 | 附加应力 /kPa |
|----|-----------|
| A  | 24.079    |
| B  | 24.432    |
| C  | 10.778    |

4.3 土力学理论计算结果

西线隧道从 A 点到 B 点长 40 m 隧道顶部受到上部建筑物传来的附加应力不足 30 kPa，进一步采用有限元对隧道结构进行内力模拟后发现，30 kPa 的外部荷载对衬砌产生的最大压应力约 0~0.45 MPa，其值相对隧道衬砌最大的 8.5 MPa 压应力可忽略不计；且增加后的隧道衬砌压应力均在材料强度安全范围内，产生的最大径向位移为 0.10 mm，可忽略不计。

东线隧道受的总附加应力小于西线隧道，地下室荷载对东线隧道产生的附加应力比较小；东线隧道主要受到 2#设备用房及 2#档案楼影响，总附加应力约为 11 kPa 左右，和西线隧道产生的近似 30 kPa 附加应力相较更小，造成的影响更小，可以忽略不计。

故从理论分析的角度，该建设工程施工可行。

5 监测结果与对比分析

5.1 监测结果

在基坑施工整个过程中，为保证下卧运营某公路隧道的安全，采用信息化施工对该隧道的拱顶位移和水平收敛进行了常规的自动化监测。限于篇幅，本文选取相对不利的西线隧道进行详细的监测对比分析。

考虑到西线隧道被影响长度约为 120 m，根据土力学计算的附加应力最大区域 A 和 B 的位置，取监测中部 90 m 作为典型监测段，每 10 m 布置一个监测面，共 10 个监测断面，每处监测面设置 2 对监测点，分别测拱顶沉降和水平收敛，其中用净空垂直位移代替拱顶沉降（隧道为全断面开挖），采用 WRM-3 型收敛计获得监测数据，精度达 0.03 mm（见图 15）。

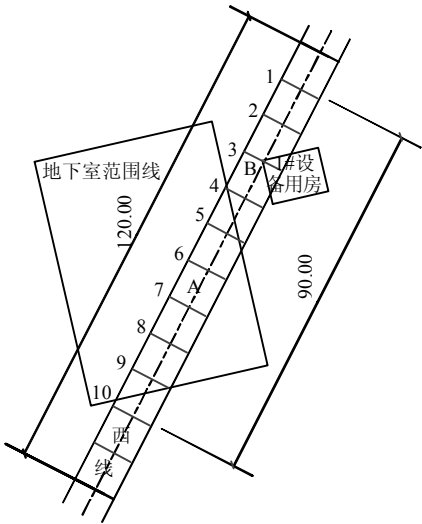


图 15 监测平面示意图(单位: m)  
Fig.15 Monitoring plan sketch(unit: m)

5.2 监测对比分析

监测面 3 处于区域 B，附加应力最大，限于篇幅，选取该监测面的现场实测值与计算值进行对比分析，绘制如图 16。图中所示的实测值与计算值相

差不多(稳定于 0.20~0.45 mm),且均小于计算值,0 隧道建成后工况(平衡状态)、1 基坑开挖后、2 工程建成后的竖向位移的实测值分别为 1.80, 1.41, 3.30 mm,均在计算值 2.20, 1.70, 3.70 mm 的安全范围内。另一方面,隧道水平收敛位移的数值模拟计算值为  $10^{-5}$  m 级,现场实测中表明水平位移基本为 0。

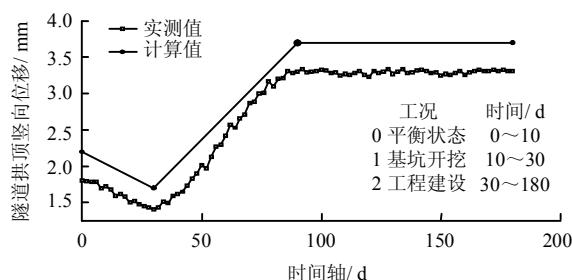


图 16 隧道拱顶竖向位移实测值与计算值对比(西线)  
Fig.16 Comparison of tunnel's vertical displacement between measured values and calculated values (the west tunnel)

综上所述,基坑开挖的卸载和工程建设的加载对下卧运营公路隧道的影响较小,说明该项目实施的可行性。

## 6 结 论

(1) 在既建公路隧道上方进行工程建设,必然会对下卧隧道产生影响,引起隧道应力以及位移的改变。本文结合具体工程,研究表明:虽然相当于卸载的基坑开挖和加载的工程建设对该拟建工程有影响,但影响较小,从有限元数值分析、土力学理论计算以及监测数据的对比,均证明了该工程建设的安全性和可行性。

(2) 本文采用了数值分析法和传统土力学两种方法进行对比研究,分析结果趋于一致。说明数值分析法和传统的土力学理论法在此类施工边界清晰、荷载施加明确的工程中同样具有适用性,而且传统的土力学理论法概念更清晰,分析难度相对较小。

(3) 对于本工程,在数值模拟方面,建立二维平面应变的模型,相对于实际的隧道三维受力状态,所得到的应力及位移有放大的倾向,实测数据表明了这一点。因此,对于类似工程而言,二维分析模型计算工作量相对较小,相较于考虑三维的实

际工程安全性更有保障。

(4) 对于实际岩土和地下工程,由于存在诸多不确定性,如土体参数、隧道目前状态等,为确保工程的安全性,有必要采取相应的实时监测手段。

## 参 考 文 献

- [1] 孔祥鹏, 刘国彬, 廖少明. 明珠线二期上海体育馆地铁车站穿越施工对地铁一号线车站的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 821—825.  
KONG Xiang-peng, LIU Guo-bin, LIAO Shao-ming. Influence of construction of Shanghai Stadium transverse station of Pearl Line phase ii on station of metro line No.1[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(5): 821—825.
- [2] 姚燕明, 周顺华, 孙巍, 等. 坑底加固对平行换乘车站基坑变形影响的计算分析[J]. 地下空间与工程学报, 2004, 24(1): 7—10.  
YAO Yan-ming, ZHOU Shun-hua, SUN Wei, et al. Calculation and analysis of influence of bottom strengthening on deformation of foundation pit for parallel transition station[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2004, 24(1): 7—10.
- [3] 陈郁, 李永盛. 基坑开挖卸荷引起下卧隧道隆起的计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 91—94.  
CHEN Yun, LI Yong-sheng. Calculation of tunnel heaving due to unloading of pit excavation[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(1): 91—94.
- [4] 刘国彬, 黄院雄, 侯学渊. 基坑工程下已运行地铁区间隧道上抬变形的控制研究与实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 202—207.  
LIU Guo-bin, HUANG Yuan-xiong, HOU Xue-yuan. The prediction and control of rebound deformation of the existed tunnels right under excavation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2001, 20(2): 202—207.
- [5] 杨栋. 地下工程开挖对临近隧道变形的影响分析[D]. 上海: 同济大学, 2008.  
YANG Dong. The influence of the underground engineering excavation on adjacent tunnel deformation analysis[D]. Shanghai: Tongji University.
- [6] 蒋洪胜, 侯学渊. 基坑开挖对临近软土地铁隧道的影

- 响[J]. 工业建筑, 2002, 32(5): 53—56.
- JIANG Hong-sheng, HOU Xue-yuan. The influence of deep excavation on adjacent metro tunnel in soft ground [J]. **Industrial Construction**, 2002, 32(5): 53—56.
- [7] 吉茂杰, 刘国彬. 开挖卸荷引起地铁隧道位移的预测方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2001, 29(5): 531—535.
- JI Mao-jie, LIU Guo-bin. Prediction method of displacement of subway tunnel due to excavation[J]. **Journal of Tongji University(Natural Science)**, 2001, 29(5): 531—535.
- [8] 王卫东, 吴江斌, 翁其平. 基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 1): 251—255.
- WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, WENG Qi-ping. Numerical modeling of affection of foundation pit excavation on metro tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp.1): 251—255.
- [9] 高盟, 高广运, 冯世进, 等. 基坑开挖引起紧贴运营地铁车站的变形控制研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(6): 818—823.
- GAO Meng, GAO Guang-yun, FENG Shi-jin, et al. Control of deformation of operating subway station induced by adjacent deep excavation[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(6): 818—823.
- [10] 戚科骏, 王旭东, 蒋刚, 等. 临近地铁隧道的深基坑开挖分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊 2): 5485—5489.
- QI Ke-jun, WANG Xu-dong, JIANG Gang, et al. Analysis of deep pit excavation adjacent to tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.2): 5485—5489.
- [11] 徐长节, 孙凤明, 陈金友, 等. 基坑相邻地铁隧道变形与应力控制措施[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(增刊 6): 75—80.
- XU Chang-jie, SUN Feng-ming, CHEN Jin-you, et al. Analysis on the deformation and stress control measures of metro tunnel near a foundation pit[J]. **Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering**, 2013, 35(Supp.6): 75—80.
- [12] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭, 等. 基坑开挖对下卧运营地铁既有箱体影响的实测及分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1109—1116.
- ZHENG Gang, LIU Qing-chen, DENG Xu, et al. Field measurement and analysis of effect of excavation on existing tunnel boxes of underlying metro tunnel in operating[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 1109—1116.
- [13] 中华人民共和国行业标准编写组. GB50011-2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50011-2010 Code of aseismic design of buildings[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.
- [14] 中华人民共和国行业标准编写组. GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB50009-2012 Load code for the design of building structures[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012.
- [15] 重庆市建设委员会. GB550330-2002 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- Chongqing Municipal Construction Commission. GB550330-2002 Construction of slope engineering and technical specification[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2002.
- [16] 王金昌, 陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 浙江大学出版社, 2006.
- WANG Jin-chang, CHEN Ye-kai. Application of ABAQUS in civil engineering[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.
- [17] 重庆交通科研设计院. JTGD70-2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- Chongqing Traffic Scientific Research and Design Institute. JTGD70-2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [18] 中华人民共和国行业标准编写组. GB 50007-2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB 50007-2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2011.