

逆作土方运输效率对运营高铁和基坑变形的影响

李明广¹, 徐安军², 董 锋², 陈锦剑¹, 王建华¹

(1. 上海交通大学土木工程系, 上海 200240; 2. 上海市基础工程有限公司, 上海 200002)

摘 要: 上海西站 15 号线地铁车站基坑下穿沪宁城际铁路, 采用全覆盖的逆作法施工, 铁路路基和基坑围护结构的变形控制要求高。该工程施工作业环境复杂, 逆作条件下的土方运输距离长、出土困难, 施工效率较低。软土地区基坑施工的环境变形具有显著的时间效应, 提高开挖施工效率可以减小由土体蠕变引起的基坑变形, 并降低施工风险。结合上海西站 15 号线地铁车站基坑工程, 采用基于软土蠕变模型数值分析方法, 研究了土方开挖运输效率对运营高铁和基坑围护结构变形的影响。结果表明: 采用高效运输设备提高施工效率 30% 后, 基坑围护结构最大水平变形可以减小 15%, 顶板最大沉降减小 20%。

关键词: 逆作法; 运营铁路; 蠕变; 变形; 相互影响

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0134-05

作者简介: 李明广(1987-), 男, 重庆人, 博士生, 主要从事岩土工程、地下工程等领域数值试验工作。E-mail: lmg20066028@163.com。

Influences of efficient transport technology of earthwork on operating railways and deformation of excavations using top-down method

LI Ming-guang¹, XU An-jun², DONG Feng², CHEN Jin-jian¹, WANG Jian-hua¹

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China; 2. Shanghai Foundation Engineering Co., Ltd., Shanghai 200002, China)

Abstract: The deep excavation of Metro Line No. 15 of West Shanghai Railway Station traverses Shanghai-Nanjing Railway. By using top-down method, deformation control of railway subgrade and diaphragm walls are highly demanded. Construction environment of this excavation is complex. Besides difficult excavation and transport of soil, its efficiency is low. During excavation, creep behavior is obvious in soft soil, so improving the construction efficiency will decrease diaphragm walls deflection caused by soil creep and lower the risk during construction. A soft soil creep model is adopted to simulate the effects on deflection behavior of high-speed railway and diaphragm walls with different conveying efficiencies in this excavation. The results show that, the maximum horizontal displacement of retaining structures decreases by 15% and the maximum settlement of roof decreases by 20% when the conveying efficiency is improved by 30%.

Key words: top-down method; operating railway; creep; deformation; interaction

0 引 言

随着我国经济实力的增强, 基坑工程得到了迅猛的发展。软土地区的基坑开挖过程具有明显的时空效应, 为此, 不少学者都做了大量的研究。刘建航(1999)提出了利用土体的时空效应减小基坑围护结构变形和周围土体沉降的理论^[1-2], 刘国彬(2006)利用该理论合理解释了上海某地铁基坑围护结构变形和地表沉降远小于周围其他工程实例这一事实^[3]。庄丽(2005)对大面积软土基坑放坡开挖引起的蠕变进行了数值模拟, 提出了适合于软土放坡开挖基坑土坡长期暴露下的幂指数形式的蠕变方程^[4]。Hsiung(2006)对台湾某车站基坑进行了蠕变变形理论与实测对比分析, 得

出了该地区动态黏滞系数的取值范围以及无支撑条件下土体蠕变变形引起墙体变形速率^[5]。

大量工程实例表明, 软土基坑的变形是由开挖引起的瞬时变形和蠕变变形共同产生的, 控制蠕变变形的增加关键在于施工时间的控制。此外, 施工时间的长短还直接影响到基坑的安全与否, 而在基坑的施工过程中最占时间的就是挖土工程, 尤其是暗挖作业。保证挖土的时间, 缩短基坑处于无支撑状态下的时间, 使围护结构处于受控状态。当基坑面积和开挖深度较

基金项目: 上海市科委重大攻关项目资助(10231200802)

收稿日期: 2012-08-23

大时, 土方运输距离长且土方量大, 快速高效的土方开挖和运输问题尤为重要。

目前, 逆作法施工的土方运输最常用的仍然是坑内小型挖土机接力翻土配合吊机和土方车运输, 其施工效率低下。为了提高逆作法施工中的土方运输效率, 充分利用大型机械设备进行挖土和运输, 日本清水建设(1996)在西铁福岗站C栋高层建筑的逆作法施工中开发了一套“挖土连续输送系统”^[6], 该系统在土方开挖和运输中首次引入了连续运输设备和技术, 提高了土方运输效率。但所用水平运输设备为常规的固定式皮带输送机, 对场地的适应能力较低。此外, 土方运输需要保持一定的均匀性而采用了小型定量供料装置, 其运输能力和效率均有限。

针对狭长逆作基坑中土方水平运输距离长、出土困难等特点, 研发了一套长距离连续土方运输及控制系统, 提高逆作土方运输效率。本文结合上海西站15号线地铁车站地下二三层深基坑工程, 采用考虑时间效应的软土蠕变模型, 研究不同施工设备条件下基坑围护结构的变形特性, 揭示不同逆作土方运输效率下的基坑变形规律。

1 工程概况

上海西站综合交通枢纽为地铁11号、15号、16号线车站, 在铁路上海西站地区形成轨道交通换乘节点, 分三个分区进行施工, A区位于铁路上海西站站台下, 地下共三层, 地下一层为地下南北通道综合大厅(已建), 与铁路#1、#2、#3站台和地铁11号线、16号线相连接, 可实现各轨道交通的零换乘, 地下二层净宽23.5 m, 深15.5 m, 主要放置地铁车站的相关设备, 地下三层净宽23.5 m, 长约84 m, 深23.5 m, 为15号线岛式站台车站。

地铁15号线车站基坑采用1 m厚、47.5 m深的钢筋混凝土地下连续墙围护体系, 墙幅之间采用锁口管柔性接头。A区内设工程桩及立柱桩共199根, 其中, 15号线范围内99根, 底板下桩体长度为46 m。地铁15号线车站主体结构为钢筋混凝土箱体。混凝土级配除结构柱为C45外, 其余均为C35。A区范围内设三道施工缝, 分四段浇筑。支护结构布置如图1。

2 工程难点

(1) 基坑开挖变形控制要求高。15号线车站A区地下二、三层基坑等级为一级。基坑总开挖深度为设计地面下23.7 m, 变形控制要求高。

(2) 高速铁路保护要求高。15号线地下一层综合大厅及南北通道结构主体已完成, 在其上方已恢复

的沪宁城际高速铁路股道由东向西横穿A区二、三层基坑开挖区上方, 沪宁城际铁路场区宽64 m, 其南侧第一股道中心距离基坑边15.8 m, 北侧第8股道中心距离基坑边9.0 m。故地下二、三层逆作施工, 对运营沪宁城际的变形影响控制要求高。

(3) 逆作暗挖法出土困难。地下南北通道A区结构上部为沪宁城际铁轨股道由西向东横穿施工场地。地下二、三层施工采用暗挖逆作法, 坑内柱网密, 间距仅3 m左右, 较大设备难以正常使用。

(4) 逆作法施工作业环境安全措施复杂。15号线车站A区二、三层逆作法施工中, 逆作地下空间通风条件差, 用电照明复杂, 多工种立体交叉施工, 挖机、电焊机等施工机具废气排放巨大, 坑内掏土、运土等影响安全的因素较多。

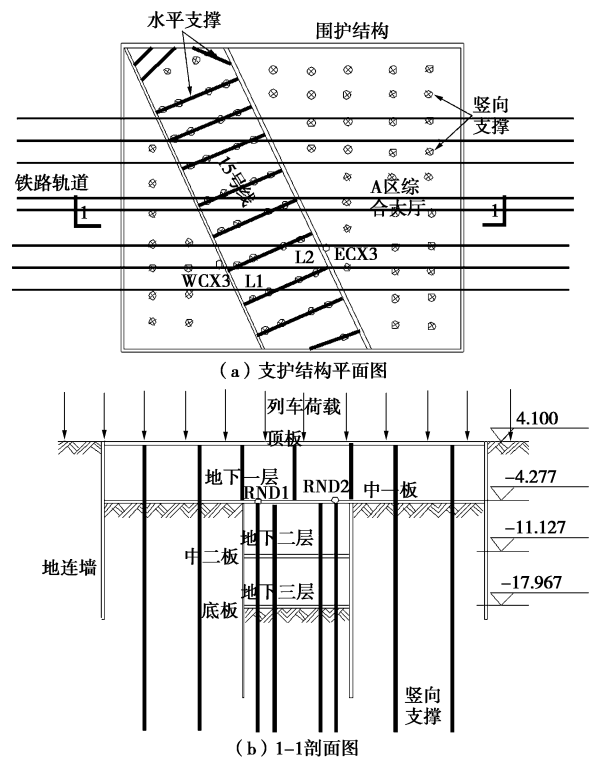


图1 支护结构示意图

Fig. 1 Diagram of supporting structures

3 逆作土方高效运输机械的应用

针对15号线车站运营城铁轨道下方进行暗挖逆作施工条件复杂、长距离运输条件下传统运输工艺效率低下、挖土机接力翻土条件差等情况, 研制出一种履带式土方运输机(如图2, 简称新设备), 通过其多单元组合实现逆作复杂工作环境下的土方长距离高效水平运输。应用该长距离连续运输装备, 配合通道式土方开挖工艺, 形成一种新型的逆作基坑出土技术应用于上海西站地铁15号线车站基坑工程。施工流程

见图3。

根据现场足尺试验结果,按每天连续工作12h计算实际挖土速度在500m³以上。采用常规挖机坑内驳运(简称旧设备),按每天连续工作12h换算每天挖土速度为377.5m³,根据以上速度关系,可以换算出采用常规运输设备每层土开挖所需时间。具体见表1。



图2 履带式土方运输车

Fig. 2 Earthwork conveyor

表1 各工况用新老运输设备施工所需要的时间表

Table 1 Construction time of different cases by uses of traditional and new equipments

计算步	施工工况	旧设备/d	新设备/d
stage0	初始地应力		
stage1	第一层土开槽	7.5	5
stage2	第一层留土开挖	22	15
stage3	第三道砼支撑制作及养护	20	20
Stage4	第二层土开槽	4.5	3
Stage5	第二层留土开挖	12	8
Stage6	A区下二层板制作及养护	32	32
Stage7	第三层土开槽	6	4
Stage8	第三层留土开挖	18	12
Stage9	第四道砼支撑制作及养护	18	18
Stage10	第四层土开槽	6	4
Stage11	第四层留土开挖	20	13
Stage12	A区结构底部制作	27	27

4 数值分析

根据表1中新老设备施工所需时间不同,本文采用软土蠕变模型(Soft Soil Model 简称SSC模型)进行数值模拟,通过考虑土体的流变特性,分析不同出土效率对运营铁路和基坑变形的影响。

(1) 基本模型与分析方法

根据实际施工特点,计算采用平面应变模型,并取一半对称结构进行分析。模型尺寸为140m×80m。计算模型的上边界为自由边界,底部全约束,侧边约束水平方向位移。本数值分析中,还考虑了列车运营荷载^[7],折算到平面应变模型,取荷载为10kN/m。计算模型见图4。土体采用15节点三角形单元。基坑的围护墙、楼板、梁和桩均用plate单元模拟,并考虑围护墙与土体的接触作用。

根据土体本构模型以及地勘报告中的相关参数,模型土体相关参数取值如表2所示。

地铁15号线A区地下二、三层采用逆作法施工,竖向共分四层开挖,挖土顺序见图5。第一层开挖至第一道支撑下、标高-9.167m处;第二层开挖至中二层楼板下、标高-13.077m处;第三层开挖至第二道支撑下、标高-16.587m处;第四层开挖至地下三层板底标高-19.647m处。土方开挖时,与支撑制作、结构施工相配合。计算工况见表1。

(2) 逆作法出土效率的影响分析

首先考虑在没有列车荷载下,结合通道式土方开挖施工工艺,对比采用低碳长距离土方运输设备连续运输和采用传统挖机坑内驳运方式下,顶板的隆沉变化和围护墙的变形差异。图6为开挖结束后,基坑围护墙侧向变形随深度变化规律。分析图中数据可知,围护墙最大水平位移出现在开挖面一定范围内,符合上海软土地区基坑开挖围护墙变形特性一般规律^[8]。采用传统运输设备围护结构最大水平位移为19.04mm,采用连续运输设备围护结构最大水平位移为17.99mm,减小了5.5%。

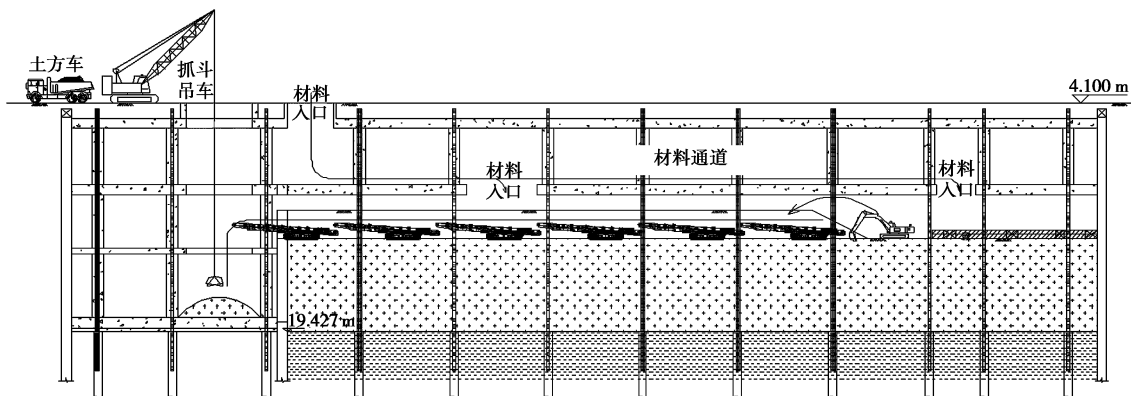


图3 新设备应用布置图

Fig. 3 Arrangement of new equipments

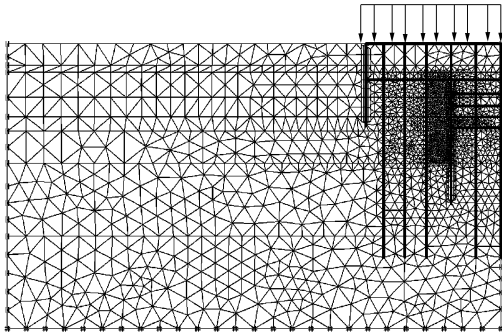


图 4 数值分析计算模型

Fig. 4 Numerical model

表 2 SSC 模型参数

Table 2 Parameters of SSC model

土层	黏聚力 /kPa	摩擦角 /($^{\circ}$)	修正压缩指数	修正回弹指数	修正蠕变指数
②	17	22.5	0.061	0.0071	0.0030
③ ₁	12	18.0	0.065	0.0075	0.0040
④	14	11.5	0.060	0.0060	0.0034
⑤ ₁₋₁	16	12.5	0.031	0.0037	0.0014
⑤ ₁₋₂	16	17.5	0.084	0.0010	0.0044
⑥	46	17.0	0.042	0.0050	0.0030
⑦ ₁	7	28.5	0.028	0.0030	0.0016

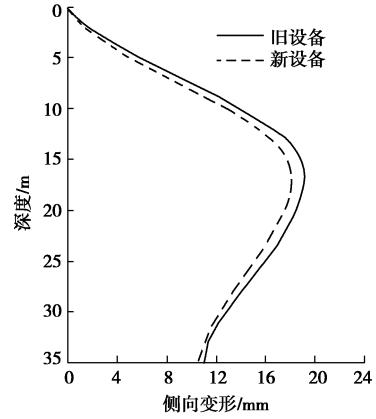


图 6 围护墙侧向变形

Fig. 6 Lateral deformation of diaphragm wall

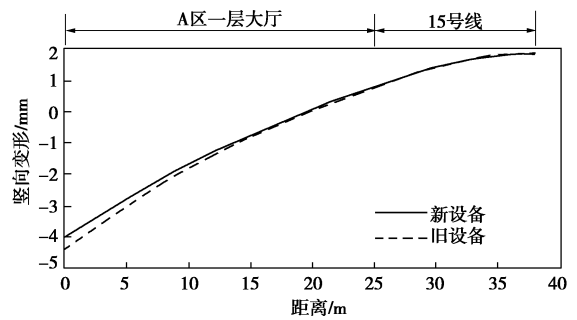


图 7 顶板竖向变形

Fig. 7 Vertical deformation of roof

(3) 上部车载作用的影响分析

上海西站 15 号线车站基坑工程在施工过程中, 沪宁高速铁路处于负荷运营状态, 为了更真实模拟实际施工过程中上部列车运行对基坑开挖过程的影响和基坑开挖过程对上部运营铁路的影响, 本文根据相关规范, 取 40 kN/m^2 荷载作用于顶板上。图 8 为考虑列车荷载下, 基坑施工完成后, 15 号线围护结构的变形随深度变化图。根据图中数据, 可以得出以下规律: 采用连续运输设备可以减小基坑围护结构最大水平位移 3.2 mm , 减小了 15% 。对比无列车荷载作用下, 采用新设备的减小量可知, 在有列车荷载作用下的基坑开挖, 提高运输效率可以取得更加显著的效果。这也证实了本工程选用低碳连续运输设备的必要性。

图 9 为有列车荷载作用下不同运输设备对 A 区顶板变形的影响。通过对比采用连续运输设备方案和传统坑内挖机驳运方案引起的顶板沉降大小差异可知, 采用新设备时, 顶板的沉降量均比采用传统设备顶板的沉降量小, 离开挖区域越远处沉降减小越大, 最大可减小 1.2 mm , 减少了 20% 。在列车荷载作用下, 顶板几乎完全处于下沉状态, 顶板的差异沉降比无列车荷载作用下小, 最大差异沉降出现在顶板沿列车轨道两端, 不超过 5 mm , 满足高低差最大尺度值小于 $4 \text{ mm}/10 \text{ m}$ 的相关规定。

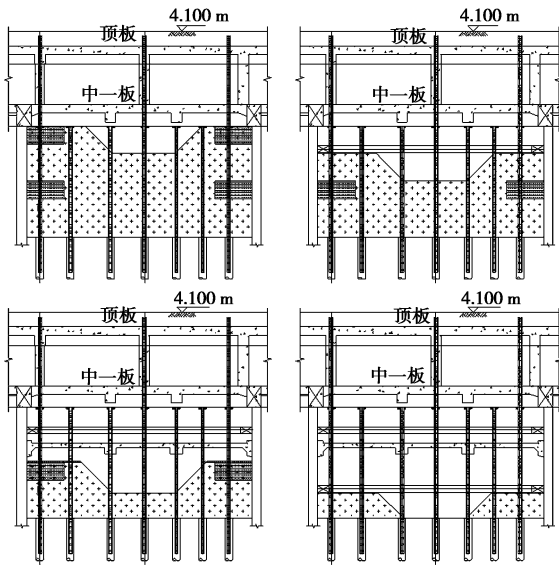


图 5 通道式挖土剖面图

Fig. 5 Section of channel-type excavation technology

图 7 为基坑开挖结束后 A 区顶板竖向变形情况。由于土体卸载作用, 带动立柱和工程桩整体上抬, 15 号线车站基坑正上方顶板隆起最大。隆起量随着离开开挖区域的距离而逐渐减小, 离开挖区域 25 m 处的 A 区一层大厅围护结构下沉, 沉降量为 4 mm 。对比连续运输方案和传统坑内驳运方案可知, 连续运输设备方案引起的沉降差为 5.899 mm , 比传统运输方案引起的沉降差小 0.34 mm , 减小了 5.6% 。

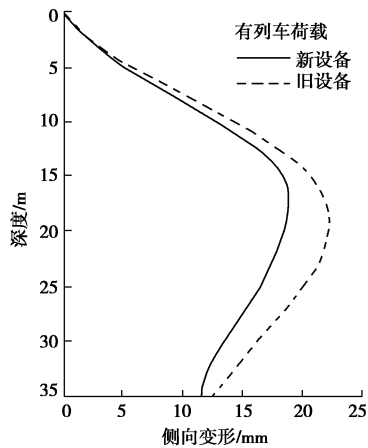


图8 围护墙侧向变形

Fig. 8 Lateral deformation of diaphragm wall

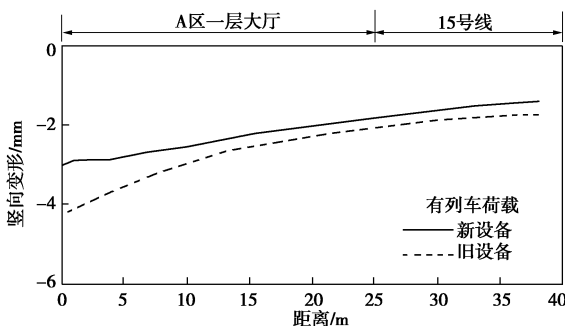


图9 顶板竖向变形

Fig. 9 Vertical deformation of roof

5 结 论

本文依托上海西站 15 号线车站研发了一套适合复杂环境下的高效长距离运输机械, 提高出土效率。通过考虑土体流变特性, 采用有限元方法分析了不同运输效率对基坑围护结构变形特性的影响规律。

(1) 根据低碳连续运输设备运输速度和传统设备运输速度关系可以算出, 采用新设备施工花 161 d 时, 采用传统设备需 193 d, 可以缩短工期 32 d, 提高了社会效益, 降低了施工风险。

(2) 与常规运输方案相比, 采用高效运输设备可以减小基坑围护结构最大水平位移 15%, 减小顶板最大竖向变形 20%。

(3) 采用低碳长距离连续运输设备, 可以有效控制基坑围护墙和顶板的变形, 尤其在有列车荷载作用下, 提高出土效率对结构变形的减小更为明显。

参考文献:

[1] 刘建航, 刘国彬, 范益群. 软土基坑工程中时空效应理论与实践(上)[J]. 地下工程与隧道, 1999(3): 7 - 12. (LIU Jian-hang, LIU Guo-bin, FAN Yi-qun. The theory and its practice by using the rule of time-space effect in soft soil

excavation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999(3): 7 - 12. (in Chinese))

[2] 刘建航, 刘国彬, 范益群. 软土基坑工程中时空效应理论与实线(下)[J]. 地下工程与隧道, 1999(4): 10 - 14. (LIU Jian-hang, LIU Guo-bin, FAN Yi-qun. The theory and its practice by using the rule of time-space effect in soft soil excavation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1999(4): 10 - 14. (in Chinese))

[3] 汪中卫, 刘国彬, 王旭东, 等. 复杂环境下地铁深基坑变形行为的实测研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(10): 1263 - 1266. (WANG Zhong-wei, LIU Guo-bin, WANG Xu-dong, et al. Study on the deformation of a deep metro excavation under complex environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1263 - 1266. (in Chinese))

[4] 庄 丽, 周顺华, 宫全美, 等. 大面积软土基坑放坡开挖引起蠕变的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 4209 - 4214. (ZHUANG Li, ZHOU Shun-hua, GONG Quan-mei, et al. Numerical analysis of creep induced by excavating slope in soft soil pit with large area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(S2): 4209 - 4214. (in Chinese))

[5] HSIUNG Bin-Chen Benson. A case study on the behaviour of a deep excavation in sand [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36: 665 - 675.

[6] 柯 言. 大范围高效挖掘运输系统[J]. 建筑技术开发, 1997, 24(1): 58 - 59. (KE Yan. Efficient digging and transporting system in extensiveness[J]. Building Technique Development, 1997, 24(1): 58 - 59. (in Chinese))

[7] 刘映晶, 陈锦剑, 王建华, 等. 基坑逆作施工与上部运营铁路的相互影响分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 142 - 145. (LIU Ying-jing, CHEN Jin-jian, WANG Jian-hua, et al. Interaction between the top-down subsurface excavation and upside running railway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 142 - 145. (in Chinese))

[8] 丁勇春, 王建华, 徐中华, 等. 上海软土地区地铁车站深基坑的变形特性[J]. 上海交通大学学报, 2008, 11(42): 1871 - 1875. (DING Yong-chun, WANG Jian-hua, XU Zhong-hua, et al. Deformation characteristics of deep excavations for metro stations in Shanghai soft soil deposits[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 11(42): 1871 - 1875. (in Chinese))