

特殊工况下地铁基坑多支撑负载响应研究

崔维久, 刘俊岩, 刘燕

(济南大学土木建筑学院, 山东 济南 250022)

摘要: 对山东省会文化艺术中心地铁车站基坑进行现场施工监测, 及时掌握支承轴力、基坑变形的变化动态。结合设计方案, 对比分析影响实际轴力变化的因素: ①特殊工况条件下, 导致多道支撑体系中第一道支撑轴力偏大, 且大于第二道、第三道支撑轴力; ②通过测温与测力, 反算出支撑轴力的温度修正系数; ③合理确定预加力大小, 减小应力损失, 保障钢支撑更好的发挥作用。该研究结果提高了现场基坑监测的准确性, 也完善了基坑支护的设计理论。

关键词: 地铁基坑; 多支撑; 监测; 施工; 温度; 应力损失

中图分类号: TU473.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0282-05

作者简介: 崔维久(1989-), 男, 山东日照人, 济南大学硕士研究生, 从事基坑工程研究。E-mail: cuiweijiu@163.com。

Response of multi-steel shotcrete under load in subway excavations

CUI Wei-jiu, LIU Jun-yan, LIU Yan

(School of Civil Engineering and Architecture of University of Jinan, Jinan 250022, China)

Abstract: Through the construction monitoring of subway station excavation in Cultural and Artistic Center of Jinan, change of axial force and deformation of steel shotcrete is gained in time. Combined with the design plan, the influencing factors for the axial force are analyzed: (1) the axial force of the first steel shotcrete is larger than the design value under certain construction conditions, and it is larger than that of the second and the third ones; (2) the temperature and axial force are gained to determine the temperature correction factor by inverse computation; (3) to rationally determine the pre-tension to reduce stress loss so as to make full play of multi-steel shotcrete. The results may make the monitoring works more exact and the design theory more perfect.

Key words: subway excavation; multi-steel shotcrete; monitoring; construction; temperature; stress loss

0 引言

随着城市地铁建设的迅猛发展, 基坑工程也越来越大、越来越深, 灌注桩加多道钢支撑作为一种既经济又合理的支护体系倍受青睐。在这种联合支护体系中, 钢支撑对控制基坑变形, 保障基坑工程的稳定具有重要作用。然而, 对于钢支撑性能的研究却甚为滞后。胡蒙达^[1]运用弹性力学理探讨了变温而产生的钢支撑附加轴力, 得到了空载作用下无约束单一钢支撑附加轴力 ΔN 与温度 T 的线性关系; 陈成等^[2]结合现场监测得到了多道支撑负载作用下的温度响应。然而, 钢支撑在使用过程中, 要受到两端支护结构的约束作用, 且现场施工工况复杂多变, 钢支撑的性能受诸多因素影响, 如施工因素、温度、应力损失等。

综上所述, 对多道支撑轴力的研究要充分考虑施工工况、温度、应力损失、负载等因素的影响。本文以山东省会文化艺术中心市政配套地铁车站基坑工程为依托, 针对工程的特殊性, 重点分析特殊工况下多道

支撑轴力变化规律。确保基坑工程安全的同时, 完善基坑支护设计理论, 弥补了多道支撑轴力研究理论的空白。

1 工程概况

1.1 水文地质条件

拟建地铁车站基坑场地地层为第四系全新统人工堆积层、冲积层及第四系上更新统冲积层, 主要由粉土、黏性土、砂类土和卵石土组成。该场地地层详述如下:

①素填土: 黄褐色, 可塑, 湿, 含少量砖屑、灰渣, 土质较均匀, 分布较普遍, 层厚: 0.30~5.00 m, 抗剪强度指标 $c=10$ kPa, $\varphi=15^\circ$

②粉质黏土: 褐黄色, 可塑, 湿, 刀切面较光滑。含铁锰氧化物, 零星砂粒, 层厚: 0.90~5.80 m, 抗剪强度指标 $c=12.7$ kPa, $\varphi=19.2^\circ$

③粉土: 褐黄—灰黄色, 中密, 湿, 含氧化铁斑

点，摇振反应迅速，刀切面粗糙。该层在场地内分布连续、较普遍，层厚：0.20~3.10 m，抗剪强度指标 $c=24.6$ ka， $\varphi=28.2^\circ$

④粉质黏土和粗砂，粗砂灰黄色，中密，湿，主要矿物成分为石英、长石，混褐黄色黏性土及卵砾石，层厚：0.50~5.30 m，抗剪强度指标 $c=0.0$ kPa， $\varphi=35.0^\circ$ 。

⑤粉质黏土：浅棕黄色，可塑，湿，含铁锰氧化物，少量姜石、砂粒。层厚： $0.20\sim8.10$ m，坑底标高位于此层。地质剖面如图1所示。

柱状图	岩土名称及其特征	地表标高27.31
①	素填土：黄褐色；稍密；湿；以黏性土为主，含少量屑、植物根等。	
②	粉土：褐黄色；稍密；湿；摇振反应迅速，刀切面粗糙；干强度及韧性低，含铁锰氧化物、少量砂粒。	
③	粉质黏土：褐黄色；可塑；无摇振反应，刀切面光滑，干强度及韧性中等，含铁锰氧化物。	
④	粉土：灰黄色；稍密；湿；摇振反应迅速，刀切面粗糙；干强度及韧性低，含铁锰氧化物、少量砂粒。	
⑤	粉质黏土：灰黄色；可塑；无摇振反应，刀切面光滑，干强度及韧性中等，含铁锰氧化物、零星姜石。	
⑥	粉质黏土：微棕黄色；湿；可塑；无摇振反应，刀切面光滑，干强度及韧性中等，含铁锰氧化物、零星姜石。	
⑦	基坑底标高10.15	
⑧	砂岩：岩芯呈柱状，柱长316 cm，岩芯采取率60%， $ROD = 30$ 。	
⑨	中砂：微棕黄色；稍密；湿；主要矿物成分为石英、长石，含少量黏性土及卵砾石。	
⑩	砾岩：岩芯呈柱状，柱长16~30 cm，岩芯采取率80%。	
⑪	粉土：棕黄色；湿；硬塑；无摇振反应，刀切面光滑，干强度及韧性高，含铁锰结核，零星姜石、角砾。	
⑫	粉质黏土：棕黄色；湿；可塑；无摇振反应，刀切面稍光滑，干强度及韧性中等，含铁锰氧化物、零星姜石。	
⑬	粉土：棕黄色；湿；硬塑；无摇振反应，刀切面稍光滑，干强度及韧性高，含铁锰结核，零星姜石、角砾。	
⑭	粉质黏土：棕黄色；湿；可塑；无摇振反应，刀切面稍光滑，干强度及韧性中等，含铁锰氧化物、零星姜石。	
⑮	支护桩底标高-8.55	
⑯	粉质黏土：棕黄色；湿；可塑；无摇振反应，刀切面稍光滑，干强度及韧性中等，含铁锰氧化物、零星姜石。	
⑰	粉质黏土：棕黄色；湿；可塑；无摇振反应，刀切面稍光滑，干强度及韧性高，含铁锰结核，零星姜石、角砾。	
⑱	粉质黏土：棕黄色；湿；可塑；无摇振反应，刀切面稍光滑，干强度及韧性中等，含铁锰氧化物、少量砂粒、零星姜石。	

图 1 典型工程地质剖面图

Fig. 1 Geological profile of typical engineering

该地区测得地下水稳定水位埋深2.60~4.60 m, 地下水较丰富。

1.2 地铁车站概况

拟建地铁车站基坑位于济南市槐荫区大饮马旧址，北临三座高层（待建），南邻大剧院（建设中），周边环境空旷，且无重要管线分布。车站起点里程为右1DK7+564.662，车站终点里程为右1DK8+055.412，车站有效站台中心里程为右1DK7+954.762。车站结构总长490.75 m。车站主体结构为双柱三跨单层矩形框架结构，车站标准段总宽度 23.9 m，车站底板最大埋深约17.8 m，采用明挖顺作法施工。本次一期施工范围为1DK7+564.662~右1DK8+003.962（1~54轴）。二期施工范围为右1DK8+003.962~右1DK8+055.412基坑平面布置图2所示。

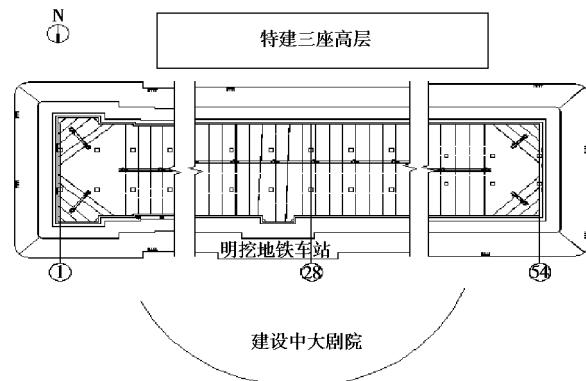


图 2 基坑平面布置图

Fig. 2 Layout of subway excavation

2 基坑支护设计与监测方案

2.1 支护设计方案

本工程采用钻孔灌注桩加内支撑支护体系。顶部放坡留台，灌注桩Φ800@1200 mm，桩间挂网喷混凝土采用强度等级C20喷射混凝土，厚度100 mm，钢筋采用Φ8@150HRP235钢筋。设置3道Φ609钢管横撑，壁厚 $t=14$ mm，横撑水平间距3.30 m，由钢立柱支撑，最大跨度为13.4 m。围檩采用145C型钢。支护剖面如图3所示。

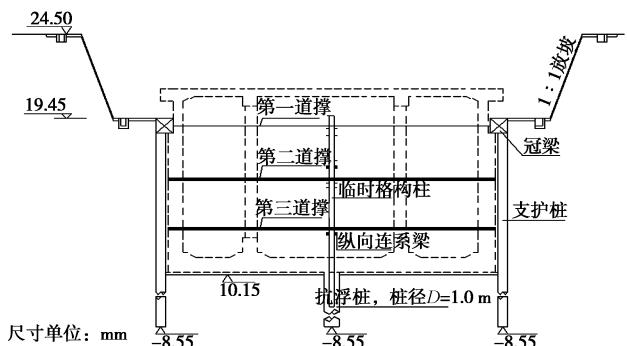
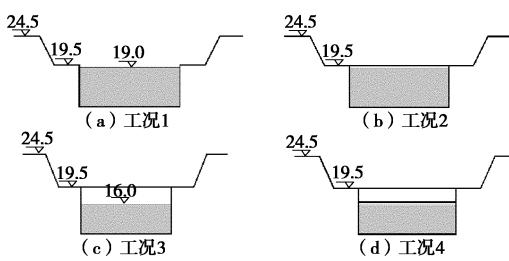


图 3 基坑支护剖面图

Fig. 3 Sectional drawing of subway excavation

实际计算时，土方开挖支护严格按照“分段分层，严禁超挖”的原则，设计时共分为7个工况，如图4所示。



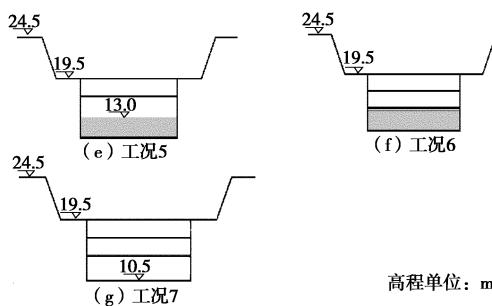


图 4 设计工况图

Fig. 4 Diagram of different design conditions

3道支撑的设计轴力值由上到下分别为：378, 1082.4, 837.9 kN。

2.2 基坑监测

依据基坑相关规范^[3]和设计要求，对该基坑工程的进行坡顶水平位移、坡顶竖向位移、地下水位、冠梁水平位移、冠梁竖向位移、深层土体位移、钢支撑轴力等监测。为保障基坑工程的安全，设计单位给出了各监测项目的报警值，如表1所示。

表 1 监测报警值

Table 1 Warning values of monitoring

监测项目	报警控制量		
	轴力值 /kN	变化速率 /(mm·d ⁻¹)	累计位移 /mm
支承轴力	第1道 264	—	—
	第2道 757	—	—
	第3道 586	—	—
深层水平位移	—	3	50
冠梁水平位移	—	3	30

3 钢支撑轴力分析

3.1 施工工况对钢支撑轴力的影响

由图5轴力时程图得同一剖面上3道支撑轴力大小关系为：第一道>第二道>第三道，这种上大下小的规律与文献[4]中规律不同。造成轴力变化规律异于常规规律的主要因素是特殊的施工工况。为追赶进度，现场施工单位违背“分段分层、严禁超挖”原则，未按照考虑时空效应^[5-7]的原设计工况挖土施工，而是改为：开挖至冠梁下2 m→加第一道支撑→开挖至底标高→顺次加第二、三道支撑。此种施工工序片面追求施工速度，存在严重的超挖现象，导致轴力变化巨大，也带来安全隐患。

由图6(a)深层水平位移曲线、图7冠梁顶水平位移曲线得：工况三（一次开挖至底标高）后，顶部位移由4 mm变为8 mm，支护桩-4.0 m处的位移由6 mm变为12 mm。最终的深层水平位移变化曲线趋于“悬臂式”，不同于原设计和文献[4]的“鼓肚式”变形曲

线，如图6(b)所示。

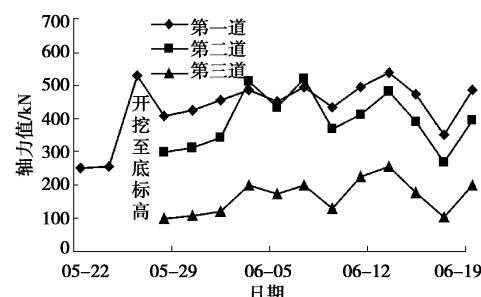


图 5 轴力时程图

Fig. 5 Variation of axial force

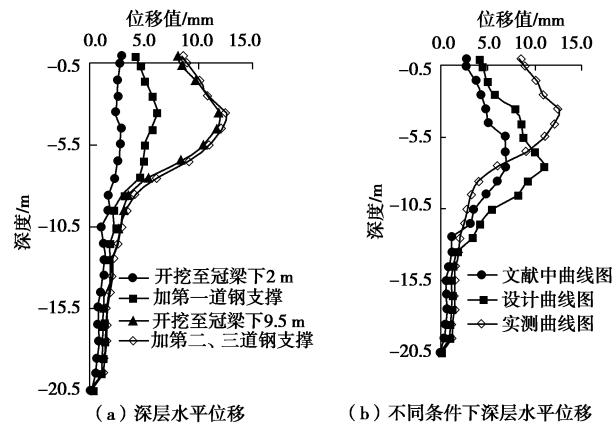


图 6 深层水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of deep layer

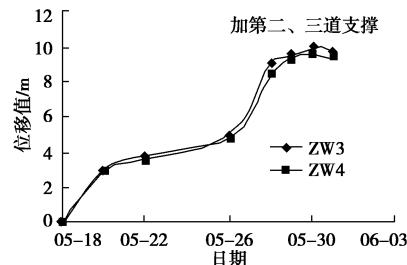


图 7 冠梁顶水平位移

Fig. 7 Horizontal displacement of top beam

支撑轴力与基坑变形密切相关，“超挖”造成位移增大，也引起钢支撑的内力重分布，使第一道钢支撑轴力252.3 kN变为532.0 kN（已超报警值）。由材料力学公式：

$$N = EA\Delta L/L$$

可近似得到排桩位移引起的轴力变化（见表2）。

安装第二道、第三道支撑之后，第一道支承轴力变为410.4 kN（超报警值），第二道、第三道支撑轴力分别为300.1, 100.25 kN。在该种特定工况下，第二道、第三道位置处的轴力实测值主要是后期土体蠕变^[8-9]、施工荷载造成，不同于原理论设计的支撑轴力，按实际工况计算所得计算值与实测平均值较接近，各种情况下轴力值如表2。

表 2 轴力值对比表

Table 2 Values of axial force of different steel shotcretes

支撑道数	各条件下轴力值/kN			
	实测	设计	计算	排桩位移
第 1 道	473.75	378	720.1	436
第 2 道	392.11	1082.4	420.12	262
第 3 道	175.85	837.9	200.25	98.2

3.2 温度对钢支撑支承轴力的影响

钢材的力学性能受温度影响较大^[10], 温度也影响钢支撑轴力, 由图 8 支撑轴力时程图易得:

(1) 在支护桩位移不变的前提下, 同一道钢支撑随温度升高而增加, 随温度下降而减小, 中午支撑轴力最高, 早上和下午支撑轴力最小。

(2) 温度变化量相同, 同一剖面上不同位置的支撑轴力的变化量不同。

济南市 6、7 月份平均温差变化 6℃~10℃, 最高气温出现在午后 14 点左右, 通过实测后统计得: 温度每改变 1℃, 第一道钢支撑轴力改变 22.23 kN; 第二道钢支撑轴力改变 15.57 kN; 第三道钢支撑轴力改变 10.67 kN。

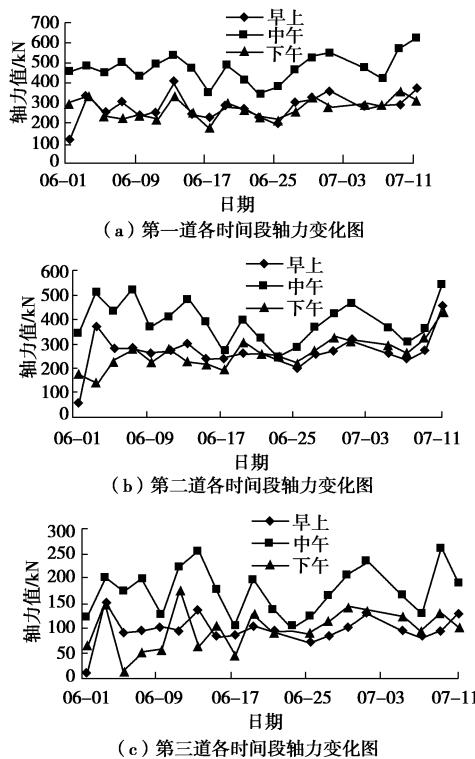


图 8 三道钢支撑轴力时程图

Fig. 8 Variation of axial force of three steel shotcretes

由弹性力学和材料力学公式, 不难得出支撑轴力与温度的关系:

$$N = \alpha \cdot \Delta t \cdot E \cdot A \quad (1)$$

式中 α 为膨胀系数 (1/℃); Δt 为温度差 (℃); E 为材料的弹性模量 (MPa); A 为材料的截面面积 (m^2)。

对于Φ609 钢管, 壁厚 $t=14$ mm, 其截面面积 $A=2.62 \times 10^{-2} m^2$, 取 $E=2 \times 10^5$ MPa, $\alpha=1.25 \times 10^{-5}$, 通过轴力改变量反算得负载作用下各道支撑线膨胀系数依次为 4.375×10^{-6} ; 3.0×10^{-6} ; 2.215×10^{-6} 。远小于钢材的线膨胀系数 $\alpha=1.25 \times 10^{-5}$, 且线膨胀系数与负载大小有关, 变化曲线如图 9 所示。

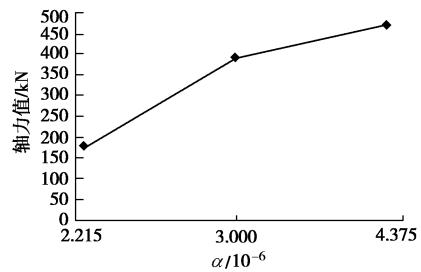


图 9 线膨胀系数与负载关系图

Fig. 9 Relationship between coefficient of linear expansion and load

实际工程中要考虑支护桩体的位移以及温度采集的方式, 在类似的工程中可借鉴下表, 运用公式 (1) 计算轴力时, 对线膨胀系数进行修正, 见表 3。

表 3 温度修正系数表

Table 3 Temperature correction factors

支撑位置	第一道	第二道	第三道
修正系数 αk	0.35	0.24	0.17

3.3 预应力损失对支撑轴力的影响

对钢支撑施加预应力, 可以有效地控制支护结构的变形, 然而预应力损失较多, 可能会导致支撑轴力不足, 引起基坑安全事故^[2]。通过现场监测, 得到轴力的变化, 如图 10。

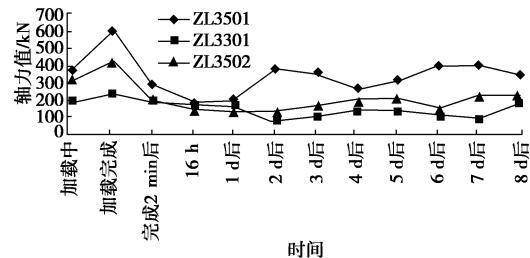


图 10 预加力施加初期支撑轴力变化图

Fig. 10 Variation of axial force during initial time

由图 10 对 35 轴 3 道支撑轴力的规律分析得:

(1) 前期施加预应力的大小会影响后期轴力变化, 前期施加预应力越大, 后期轴力就越大。

(2) 加载完成后 2 min 会有较大的预应力损失, 为预加力的 50% 左右, 16 h 之内还会有少量损失, 约为 10%~15% 左右。

(3) 超加 20% 预应力或持荷 2 min 都能有效减少预应力损失。

4 结 论

(1) 多支撑支护体系中各道支撑轴力受施工工况影响显著, “超挖、加撑滞后”导致第一道支撑轴力远大于设计值, 危险报警, 第三道支撑轴力远小于设计值, 在施工中应杜绝此类现象; 若存在此类工况, 应适当加大第一道支撑刚度、减小支撑间距, 同时加大第三道支撑间距, 保障基坑安全。

(2) 多支撑体系中各道支撑轴力受温度影响不同, 温度变化量相同时, 第一道支撑轴力变化最大, 第二道次之, 第三道最小; 本文提出的修正系数, 在类似工程设计、施工中可作参考。

(3) 合理确定预应力值大小, 改善施工工艺, 减小预应力损失; 在基坑重要部位安装预应力补加装置, 防止支撑轴力过小造成基坑事故。

参 考 文 献 :

- [1] 胡蒙达. 地下围护结构中Φ609 钢支撑受变温 Tr 作用下的热应力计算[J]. 地下工程与隧道, 1998(1): 13 - 15. (HU Meng-da. Thermodynamic calculation of Φ609 steel brace under temperature change in underground bracing structure[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1998(1): 13 - 15. (in Chinese))
- [2] 陈 成. 地铁车站基坑钢管内支撑工作性能研究[D]. 郑州: 郑州大学. (CHEN Cheng. The working behavior research of steel shotcrete of subway station foundation pit[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University. (in Chinese))
- [3] GB50497—2009 建筑基坑工程检测技术规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009. (GB50497—2009 Technical code for monitoring of building excavation engineering[S]. Beijing: China Planning Press. (in Chinese))
- [4] 李运涛, 前 进. 地铁深基坑开挖与支承轴力、围护结构变形监测分析[J]. 隧道/地下工程, 2004, 4(6): 54 - 57. (LI Yun-tao, QIAN Jin, et al. The analysis of deformation of retaining structure and axial force of bracing during excavation[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2005, 33(5): 547 - 550. (in Chinese))
- [5] 刘建航, 侯学渊, 等. 基坑施工时空效应理论与实践[R]. 上海: 地铁总公司, 同济大学, 1997. (LIU Jian-hang, HOU Xue-yuan, et al. The time-space theory and practice in excavation engineering[R]. Shanghai: Shanghai Metro Company and Tongji University, 1997. (in Chinese))
- [6] 刘 燕, 刘 涛, 胡承军, 等. 上海地铁 M8 线某车站基坑开挖变形特征分析[J]. 浙江工业大学学报, 2005, 33(5): 547 - 550. (LIU Yan, LIU Tao, HU Cheng-jun, et al. The research of deformation laws of shanghai metro line 8 station pit[J]. Zhejiang Industrial University Journal, 2005, 33(5): 547 - 550. (in Chinese))
- [7] 蒋洪胜, 刘国彬. 软土深基坑支撑轴力的时空效应变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(6): 105 - 107. (JIANG Hong-sheng, LIU Guo-bin. Time-space effect on strut-force in deep excavation of soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 105 - 107. (in Chinese))
- [8] 黄文熙. 土的工程性质[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983. (HUANG Wen-xi. Engineering behaviors of soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 1983. (in Chinese))
- [9] 王 坤. 深圳土体蠕变在深基坑工程中的应用[J]. 铁道工程学报, 2011, 155(8): 1006 - 2106. (WANG Kun. The soil creep application in foundation pits[J]. Chinese Journal of Railway Engineering, 2011, 155(8): 1006 - 2106. (in Chinese))
- [10] 陈绍蕃. 钢结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (CHEN Shao-fan. Steel structure[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)