

深基坑开挖对邻近边坡稳定性影响与控制

秦坤元¹, 刘五一¹, 肖育斐¹, 张健¹, 阳军生², 刘守花², 王健宏²

(1.中国水利水电第八工程局有限公司, 湖南 长沙 410004; 2.中南大学 土木工程学院)

摘要:长沙地铁4号线黄土岭地铁站基坑南侧12 m位置有一高8 m的原状土边坡,且距坡顶11 m位置有一栋7层砖混结构建筑物,为增加施工空间,将对坡脚位置进行削坡处理,削坡后边坡坡角高达75.0°,边坡削坡、基坑开挖对边坡稳定性和既有建筑物的影响不容忽视。该文以黄土岭车站基坑工程为依托,采用有限差分软件FLAC^{3D}对削坡及基坑开挖支护进行数值模拟,分析削坡、基坑开挖对邻近边坡的影响,并提出保证边坡稳定的技术措施,通过数值模拟对控制措施可行性进行分析,最后通过实测结果分析边坡的加固效果。

关键词:深基坑; 边坡; 稳定性; 控制技术

城市地铁大都建在人口密集的地方,车站周边地形情况通常比较复杂,基坑施工场地十分狭小,当基坑周边近接边坡时,为保证现场有充足的施工场地,通常会对边坡进行削坡处理,特别是当边坡上部有建筑物存在时,削坡、基坑开挖对边坡稳定性及坡顶建筑物影响不容忽视。

目前,针对不对称岩土荷载作用下深基坑变形性状已有部分研究。石钰锋等以深圳地铁民治站基坑工程为依托,对紧邻铁路偏压基坑的变形形状进行了系统的研究;刘波等以某紧邻高速公路深基坑工程为背景,应用数值方法对偏压作用下非等深基坑开挖效应进行分析;林刚等应用数值方法对不平衡堆载下深基坑支护结构的性状进行了研究;刘继强等以深圳地铁5号线水径车站基坑工程为背景,运用数值方法分析基坑与边坡不同间距下基坑的稳定性特征。针对边坡稳定性的研究较多,杨峰等基于刚体平动运动单元的上限有限元理论,建立边坡稳定性分析方法,获得了边坡渐进失稳过程中的稳定性状况;曾文西等基于饱和一非饱和渗流计算方法,分析了渗透系数对边坡稳定性的影响;张磊等建立了渗流潜蚀耦合的边坡稳定性分析模型,并采用有限元方法模拟分析了初始饱和渗透系数、进气值参数对入渗和边坡稳定性的影响;曾田等基于饱和一非饱和理论,应用数值方法,分析了降雨对边坡稳定性的影响。总之,对于不对称岩土荷载作用下的深基坑,主要关注不对称荷载对基坑稳定性的

影响,但基坑开挖对边坡影响的研究较少,因此有必要开展进一步的研究。

该文以长沙地铁4号线黄土岭车站基坑工程为背景,采用FLAC^{3D}有限差分软件,对边坡削坡、基坑开挖过程中边坡稳定性进行分析,根据数值结果提出相应的边坡加固措施,并对施工全过程边坡和建筑变形进行实时监测,通过对实测结果统计整理,分析边坡加固实际实施效果。

1 工程概况

长沙地铁4号线黄土岭车站位于芙蓉南路与赤黄路交叉口,沿黄土岭路呈东西向布置。赤黄路在交叉路口处地势高差较大,在基坑南侧6 m位置存在原状土边坡,边坡高8 m。车站周边管线和高层建筑分布众多(图1),施工场地十分狭小,为确保充足的施工空间,将对基坑南侧边坡坡脚进行削坡处理。勘察资料显示,施工场地范围内地层自上而下分别为:杂填土、粉质黏土、粉细砂、中粗砂、卵石、粉质黏土、强风化泥质粉砂岩、中风化泥质粉砂岩。地下稳定水位为3.5~7.3 m,水位标高62.2~71.1 m。

黄土岭车站范围均位于现状道路路面以下,为了不影响黄土岭路的正常交通,车站采用半盖挖法施工。车站基坑长214.3 m,标准段宽23.1 m,基坑深度24~26.5 m,基坑采用地下连续墙+内支撑相结合的支护

收稿日期:2018-12-04

基金项目:中国水利水电第八工程局有限公司横向课题(编号:SDBJ-CSDT-JS-2017-001)

作者简介:秦坤元,男,大学本科,高级工程师,E-mail:18945087415@163.com

结构。地下连续墙厚 1 m,坑底地层为中风化泥质粉砂岩时,地连墙的嵌固深度取 3 m,坑底地层为强风化泥质粉砂岩时,嵌固深度取 5 m。沿基坑深度方向共设置 4 道内支撑,其中第 1 道和第 3 道内支撑采用混

凝土支撑,水平间距 6 m,第 2 道和第 4 道内支撑采用外径为 609 mm,厚 16 mm 的钢支撑,水平间距为 3 m,标准段支护断面如图 2 所示。

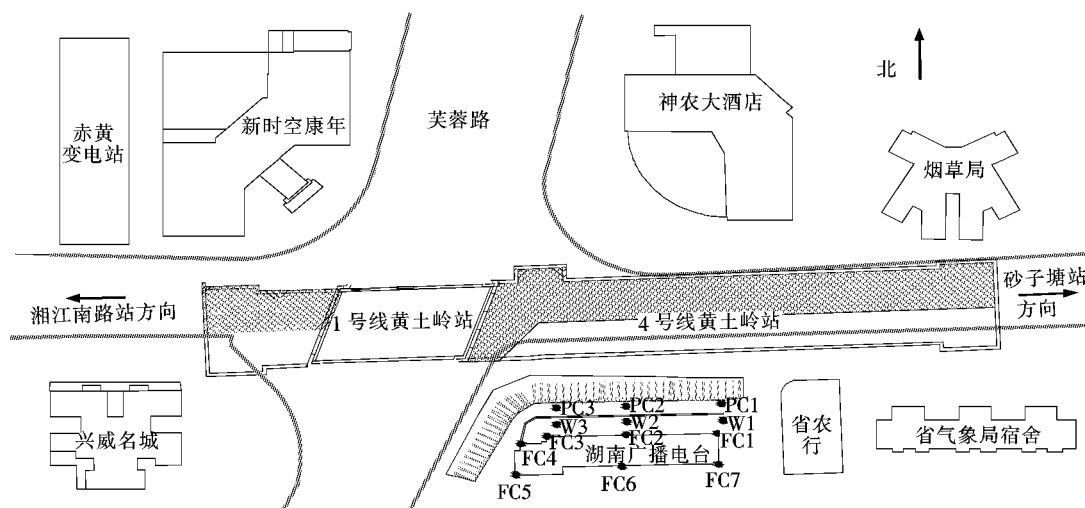


图 1 黄土岭车站平面图

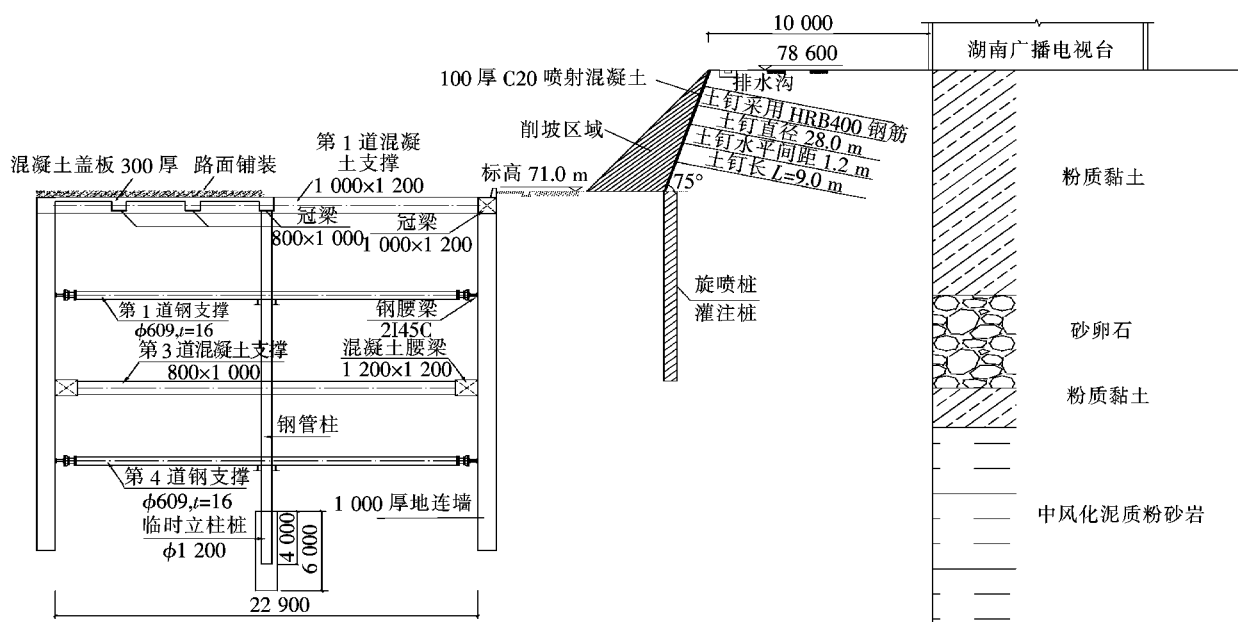


图 2 标准段支护结构图(单位:mm)

2 基坑开挖对邻近边坡影响分析

为保证边坡削坡和基坑开挖过程中邻近高边坡的稳定,采用有限差分软件 FLAC^{3D}建立基坑开挖支护的数值模型,分析削坡、基坑开挖对邻近边坡的影响。为确保边坡稳定性,边坡坡顶位移应小于 22.5 mm。

2.1 有限元建模

为提高计算效率,标准段沿基坑长边方向选取 14 m 进行数值建模,为降低边界效应对计算结果的影响,基坑坑壁到模型边界的距离为 $(3 \sim 4)H$,其中 H 为基坑开挖深度,模型尺寸取 $X \times Y \times Z$ 为 $180 \text{ m} \times 98 \text{ m} \times 14 \text{ m}$ 。模型侧面限制其水平方向位移,底面为固定边界条件,上边面为自由边界,计算模型见图 3。

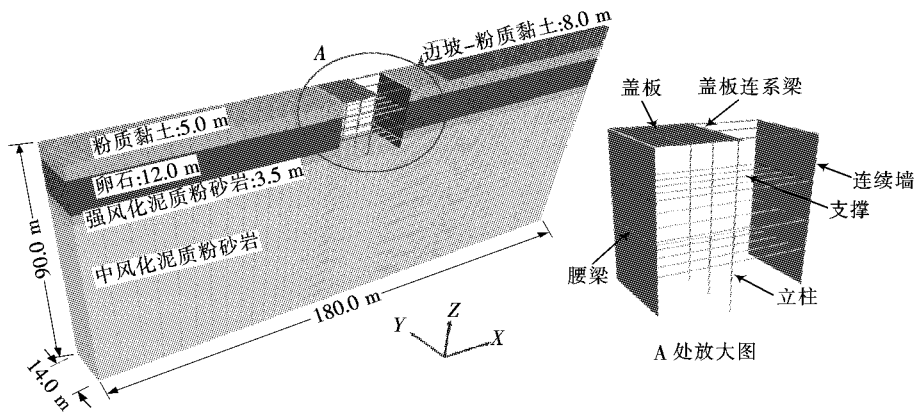


图3 有限元模型

土体和地下连续墙采用实体单元(Zone 单元)模拟,内支撑和立柱采用梁单元(Beam 单元)模拟,采用桩单元(Pile 单元)模拟立柱桩。模型中地下连续墙和土体之间的相互作用采用地下连续墙侧面和底面的接触面实现,内支撑和地下连续墙直接的相互作用则采用连接实现。其中,除地下连续墙混凝土强度等级为C35,弹性模量取 31.5 GPa 外,其他混凝土结构强度等级均为 C30,弹性模量取 30 GPa,泊松比均为 0.25;钢支撑和钢腰梁弹性模量均为 209 GPa,泊松比取 0.3。

基坑开挖是土体卸荷的过程,Mohr—Coulomb 模型所需参数少,且计算结果与工程实测结果比较接近,但计算分析中卸载和加载采用同一模量;修正剑桥模型(MCC)对于土体的模量依赖于应力水平和应力路径,应用于基坑分析时计算结果更加合理可靠,但模型参数较多,且仅适用于正常固结和弱超固结黏土。因此,粉质黏土和 中风化泥质粉砂岩的本构采用修正剑桥模型模拟,砂卵石地层采用摩尔库仑进行模拟,具体土体的计算参数见表 1。

表1 地层参数表

地层	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{cm}^{-3})$	M	λ	K	μ	e_0	c'/Pa	$\varphi'/(^{\circ})$	E/Pa
杂填土	19.0	1.20	0.029 3	0.003 6	0.35	1.12			
粉质黏土	19.8	1.29	0.031 2	0.006 5	0.35	0.71			
砂卵石	23.0				0.30	0.82	0	35	1.5×10^8
粉质黏土	19.8	1.38	0.044 5	0.009 8	0.35	0.76			
中风化泥质粉砂岩	22.8				0.28	0.64	2.0×10^5	32	5.0×10^8

注: γ 为土体重度; M 为临界状态参数; λ 为 $e-\ln p$ 压缩曲线斜率; K 为 $e-\ln p$ 回弹曲线斜率; μ 为泊松比; e_0 为初始孔隙比; c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; E 为弹性模量。

根据实际施工过程,数值模拟共分为 11 个分析步:① 初始地应力平衡;② 施作地下连续墙和立柱;③ 挖除表层土体和削坡;④ 施作第 1 道内支撑;⑤ 土体开挖至-8 m;⑥ 架设第 2 道钢支撑并施加预应力;⑦ 土体开挖至-15 m;⑧ 施作第 3 道混凝土支撑;⑨ 土体开挖至-20 m;⑩ 施作第 4 道钢支撑并施加预应力;⑪ 基坑开挖至坑底(-24 m)。

2.2 数值结果分析

图 4、5 分别为边坡削坡后和基坑开挖完成后土体应力状态云图。图 4、5 显示,边坡削坡后位于坡脚及坡脚下部土体出现较大区域的剪切塑性区和拉伸塑性区,且塑性区为贯通,边坡处于稳定状态;基坑开挖完

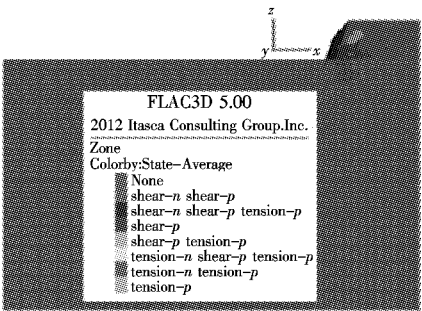


图4 边坡削坡后土体应力状态云图

成后,边坡拉伸塑性区进一步扩展至距坡顶不足 1 m 位置。考虑到施工过程中的施工扰动、降水对边坡影响,边坡发生失稳的概率极大,由于边坡坡顶建筑物的

存在,边坡失稳将严重危害人身和财产安全,且边坡属于永久性边坡,应在边坡削坡后及时对边坡进行永久加固以保证边坡稳定性。

图 6 为施工过程中边坡坡顶位移曲线,坡顶水平位移以向基坑侧变形为正,竖向位移以沉降位移为正。

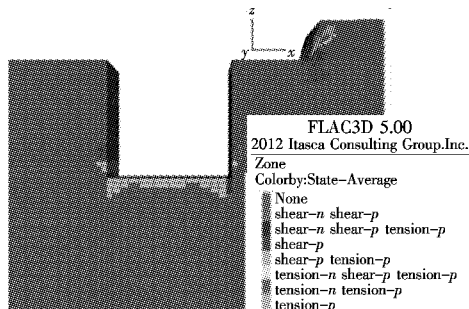


图 5 基坑开挖完成后土体应力状态云图

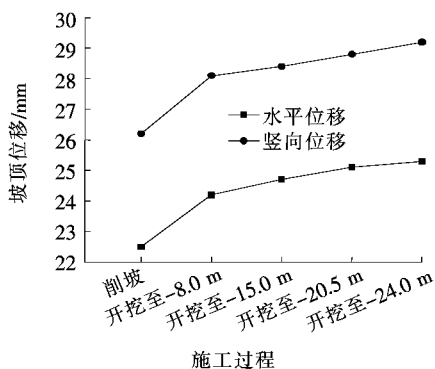


图 6 边坡坡顶位移曲线

由图 6 可看出:① 边坡削坡后坡顶竖向位移达 26.2 mm,基坑开挖后坡顶竖向位移增大至 29.2 mm,由基坑开挖引起的坡顶竖向位移增大了 3 mm,约占坡顶总竖向位移的 10.3%,且边坡坡顶竖向表现为沉降位移特征;② 削坡后坡顶水平位移为 22.6 mm,基坑开挖使坡顶水平位移增大至 25.3 mm,由基坑开挖引起的坡顶水平位移约占总水平位移的 10.7%。边坡坡顶的位移主要由削坡引起,基坑开挖对边坡的影响较小,且坡顶位移大于边坡稳定控制值。

3 边坡稳定安全控制措施

3.1 边坡加固措施

数值结果显示削坡及基坑开挖使边坡稳定性不满足要求,为保证边坡稳定及坡顶建筑的正常使用,基坑开挖前需对边坡进行预加固。为增大边坡体的抗滑力,约束边坡体的变形,坡面采用土钉和挂网喷射混凝土主动加固;同时为平衡边坡体滑坡推力,在坡脚采用

抗滑桩对边坡进行被动加固。坡面土钉与坡脚抗滑桩联合加固,确保边坡稳定及坡顶建筑物安全。

边坡采用土钉和挂网喷射混凝土进行加固。其中,土钉竖向布设 5 排,水平间距 1.2 m,与水平向夹角为 15° ,土钉长 9 m,采用直径为 28 mm 的 HRB 400 级热轧带肋钢筋;挂网喷射混凝土厚 100 mm,采用直径 8 mm HPB 300 钢筋,钢筋间距 300 mm。

采用钻孔灌注隔断桩和三重高压旋喷桩止水相结合方式对边坡坡脚进行加固。其中,钻孔灌注桩桩径 800 mm,间距为 1 000 mm;三重高压旋喷桩桩径 800 mm,间距 550 mm。坡脚钻孔灌注桩兼做车站 4 号出入口结构的围护结构,由于 4 号出入口结构线尚未确定,先期仅施作土钉及挂网喷射混凝土对边坡进行加固,坡脚钻孔灌注桩及旋喷桩待 4 号出入口边线确定后施作。

3.2 边坡加固措施的可行性

考虑土钉+挂网喷射混凝土对边坡进行加固(由于车站主体基坑开挖过程中为施作钻孔灌注隔断桩,数值模型中不考虑隔断桩的作用),土钉采用 Cable 单元进行模拟,挂网喷射混凝土采用 Shell 单元模拟,建立基坑开挖数值模型,分析加固后基坑开挖对边坡的影响。图 7 为加固后基坑开挖完成后土体的应力状态云图,对比图 5、7 可发现,边坡坡面加固后基坑开挖对边坡塑性区的影响减小,塑性区在削坡后并未随基坑开挖进一步扩展,说明坡面加固措施是有效的。

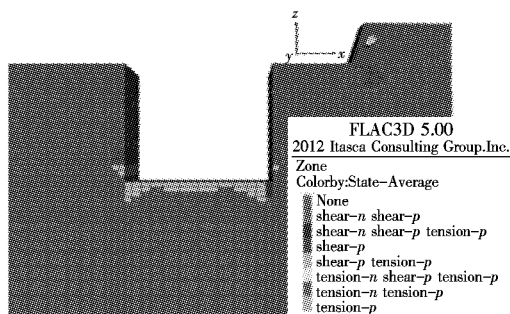


图 7 基坑开挖完成后土体应力状态云图(加固后)

4 边坡安全控制效果分析

4.1 施工监测

为保证施工全过程边坡和坡顶建筑物的稳定安全,对坡顶变形、坡顶建筑沉降及建筑周边地表沉降进行施工全过程监测,监测点详细布置如图 1 所示。其中,坡顶变形和地表沉降的预警值为 22.5 mm。

4.2 实测结果分析

图8、9分别为坡顶竖向和水平位移曲线图,竖向以沉降变形为负,水平向以向基坑侧变形为负。由图8、9可看出:边坡变形和地表沉降最大值均小于预警值22.5 mm,且建筑物沉降最大值小于预警值,表明边坡加固效果安全可靠。

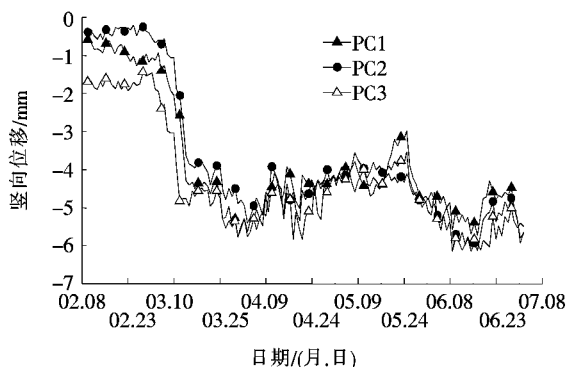


图8 坡顶竖向位移图(2017年)

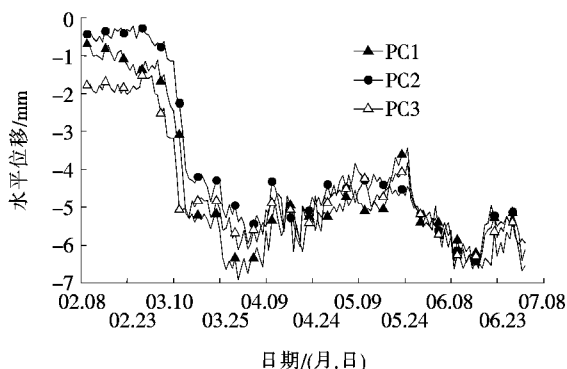


图9 坡顶水平位移图(2017年)

5 结论

以长沙地铁4号线黄土岭地铁车站工程为依托,采用数值方法分析了边坡削坡和基坑开挖对邻近边坡稳定性的影响,并提出了保证边坡稳定的安全控制措施,最后通过实测数据分析了边坡的加固效果,可得如下结论:

(1) 边坡土体应力状态,边坡削坡后坡脚和坡脚

下部土体出现较大区域塑性区;边坡坡顶位移,边坡削坡后坡顶水平和竖向位移均大于边坡稳定控制值。数值结果表明,削坡对边坡的影响不容忽视,应在削坡后及时采取合理的边坡加固措施。

(2) 为保证边坡的稳定性,提出采用土钉和挂网喷射混凝土加固坡面+钻孔灌注桩加固坡脚的组合加固措施,实测结果显示施工阶段边坡和坡顶建筑始终处于安全稳定状态,表明现场采用边坡加固措施有效,可为后续类似边坡加固提供参考。

参考文献:

- [1] 石钰锋,阳军生,白伟,等.紧邻铁路偏压基坑围护结构变形与内力测试分析[J].岩石力学与工程学报,2011(4).
- [2] 石钰锋,宁锐,张学民,等.列车动载影响下偏压地铁基坑稳定性分析[J].铁道标准设计,2009(12).
- [3] 刘波,席培胜,章定文.偏压作用下非等深基坑开挖效应数值分析[J].东南大学学报:自然科学版,2016(4).
- [4] 林刚,徐长节,蔡袁强.不平衡堆载作用下深基坑开挖支护结构性状研究[J].岩土力学,2010(8).
- [5] 刘继强,田志强,林志斌,等.高边坡对邻近基坑稳定性的影响研究[J].隧道建设,2011(3).
- [6] 杨峰,赵炼恒,张箭,等.基于刚体平动运动单元的上限有限元研究[J].岩土力学,2014(6).
- [7] 曾文西,肖新辉.土质边坡在渗透系数各向异性条件下的稳定性分析[J].中外公路,2017(3).
- [8] 张磊,张璐璐,程演,等.考虑潜蚀影响的降雨入渗边坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2014(9).
- [9] 增田,吴逢春,张晓春.降雨条件下的边坡稳定性分析[J].中外公路,2008(4).
- [10] GB 5003—2013 建筑边坡工程技术规范[S].
- [11] 徐中华.上海地区支护结构与主体地下结构相结合的深基坑变形性状研究[D].上海交通大学博士学位论文,2007.
- [12] 丁勇春,王建华,徐斌.基于FLAC^{3D}的基坑开挖与支护三维数值分析[J].上海交通大学学报,2009(6).
- [13] 王祥秋,刘喜元,张文基,等.下沉式立交软土深基坑工程施工数值仿真分析[J].中外公路,2008(3).
- [14] 段坚堤,王海林.双圆形超深基坑受力与变形特性研究[J].中外公路,2014(3).