

土岩组合地区桩锚支护基坑开挖地表沉降分析

黄敏¹, 刘小丽^{1, 2*}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要: 针对青岛地区典型桩锚支护结构型式的土岩组合基坑, 通过有限元模拟, 对土层厚度、锚杆布设、支护桩嵌入岩层的相对深度、岩层组成及开挖方式等不同条件下基坑开挖引起的地表沉降特征进行了计算分析, 在基坑地表沉降模式、灌注桩的嵌岩比、基坑开挖影响范围、地表沉降与桩体水平位移的关系等方面得到了一些定性和定量的基本规律, 可为类似基坑工程的设计开挖提供借鉴。

关键词: 地表沉降; 桩锚支护; 基坑; 土岩组合地区; 开挖

中图分类号: TU463

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2012)S0-0571-05

作者简介: 黄敏(1988-), 女, 湖北荆州人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的学习与研究。E-mail: 1988huangmin@163.com。

Ground settlement induced by excavation of pile-anchor retaining foundation pits in soil-rock mixed areas

HUANG Min¹, LIU Xiao-li^{1, 2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environment and Ecology, Ministry of Education, Qingdao 266100, China)

Abstract: Taking a typical pile-anchor retaining deep foundation pit in Qingdao soil-rock area as an example and by using the finite element numerical simulation, the surface settlement characteristics induced by excavation are investigated under different conditions such as soil thickness, anchor layout, socket depth of retaining pile in rock, rock layers and excavation methods. For the ground surface settlement curve, insertion ratio of pile in rock, settlement influence zone and relation between the surface settlement and the pile displacement, some conclusions are drawn, and they may be helpful for similar projects.

Key words: ground surface settlement; pile-anchor supporting structure; foundation pit; soil-rock mixed area; excavation

0 引言

随着城市化的发展, 由基坑施工引发的环境效应问题日益突出, 地表沉降是基坑施工对环境效应影响的一个主要指标。

目前对地表沉降的研究, 主要集中在软土地区内支撑式围护结构的基坑开挖工程中^[1-3]。对于桩锚支护结构型式下的基坑开挖, 其地表沉降研究较少, 只有一些定性的分析^[4]。

青岛地区土岩组合地层分布广泛, 基坑工程中桩锚支护结构应用较多, 且针对土岩组合地层的特点, 对于基坑开挖底面位于中风化或微风化等岩层中的基坑工程, 形成了桩锚组合支护结构的新类型, 俗称“吊脚桩”支护结构^[5], 即灌注桩桩底位于基坑开挖底面以上一定深度处, 其具体结构型式详见后文中所述。

针对青岛土岩组合地区这种典型桩锚支护结构型式, 即“吊脚桩”支护结构下基坑开挖引起的地表沉降问题, 目前还未见深入研究, 鉴于这种基坑支护结

构的独特性及其应用的广泛性, 通过有限元计算分析, 对这种支护结构条件下土岩组合基坑开挖引起的地表沉降特征进行分析, 为相关工程实践提供参考。

1 典型桩锚基坑支护结构简介

选取2个典型“吊脚桩”类型的桩锚支护结构剖面(分别命名为剖面1和剖面2), 对其支护结构及其相应地层条件进行介绍, 2个剖面如图1中所示。

图1(a)中剖面1的土层总厚度7m, 开挖深度20m, 灌注桩桩径1m, 桩间距2m, 嵌入岩层深度为3.8m, 混凝土标号为C25。从地表以下7m处开始放坡, 坡脚宽1m, 放坡系数1:0.1。基坑上部支护结构型式为桩锚支护, 下部放坡, 采用锚喷结构。

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2009FQ028)

收稿日期: 2012-08-24

*通讯作者

剖面 2 土层厚 10 m，具体见图 1 (b)，从地表以下 10 m 处开始放坡，基坑支护结构型式与剖面 1 中相似，由于土层厚度的增加，增设 1 道预应力锚杆(索)。图 1 所示剖面中最后一道锚杆类型为 2 ϕ 15.2，预应力 150 kN，其余均为 3 ϕ 15.2，施加预应力 200 kN。

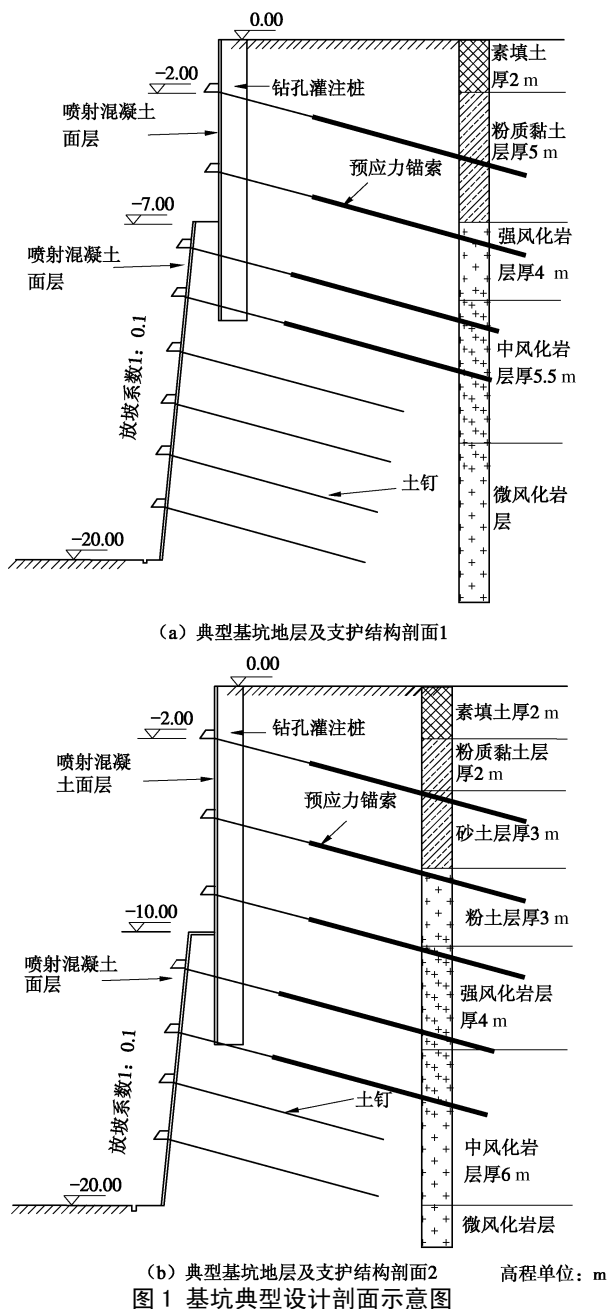


图 1 基坑典型设计剖面示意图

Fig. 1 Typical supporting structure section of foundation pit

图 1 所示结构的锚杆布设方案中，锚杆水平间距 2 m，第 1 道锚杆位于地表以下 2 m，称此种布设方案为锚杆布设方案 1；在后面的数值计算方案中，将第 1 道锚杆位于地表以下 4 m 时的锚杆布设方案称为方案 2。锚杆布设方案 1 和方案 2 除了第 1 道锚杆位置不同外，各锚杆之间的间距也略有调整，此处不再赘述。

图 1 中所示这种“吊脚桩”支护结构适用于土岩

组合地层的基坑，土层和岩层基本上分别约为基坑开挖深度的 1/3~1/2，且岩层中性质较好的中风化岩层和微风化岩层的厚度相对性质较差的强风化岩层厚度较大的情况。工程实践中强风化岩层的厚度一般不大于 6 m。

2 数值计算模型及计算方案

2.1 有限元计算模型

利用 PLAXIS2D 有限元分析软件，对图 1 中所示基坑工程的开挖进行有限元模拟。以图 1 (a) 中基坑剖面 1 为例，对有限元数值计算模型进行简介。

如图 2 所示为有限元数值计算模型，采用平面应变模型，由于基坑对称，取其一半考虑。

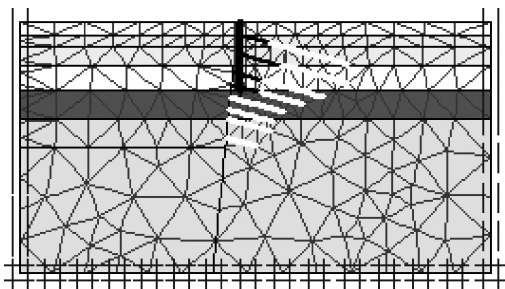


图 2 基坑剖面 1 有限元模型

Fig. 2 Finite element model for section 1

在数值模型中，钻孔灌注桩通过抗弯刚度等效为地下连续墙，利用板单元来模拟，采用线弹性模型。预应力锚杆的锚固段用土工格栅单元模拟，自由段用点对点锚杆单元模拟。土体采用硬化土模型，岩体采用莫尔-库仑模型，用 15 节点三角形单元进行网格剖分，不考虑地下水和工程爆破的影响。

钻孔灌注桩弹性模量 28 GPa，土工格栅(注浆体)弹性模量 25.5 GPa，岩土体参数如表 1、2 中所示，表 2 中 E_{50}^{ref} 是硬化土模型中的主要参数，其含义是标准固结排水三轴试验中的割线模量。

表 1 土层参数				
Table 1 Soil parameters				
参 数	E_{50}^{ref} /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	重度 /(kN·m ⁻³)
素填土	12	10	20	20
粉质黏土	11.5	21	6	20.5
砂土	15	3	20	21
粉土	13.5	13	17.4	22

表 2 岩层参数					
Table 2 Rock parameters					
参数	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	重度/(kN·m ⁻³)
强风化岩	45	0.34	40	42	22
中风化岩	8000	0.30	100	55	23
微风化岩	25000	0.20	100	70	25

表 3 有限元计算方案一览表
Table 3 Finite element analysis schemes

编 号	土层厚度/m	锚杆布设	灌注桩插入比 λ	岩层组成	岩层开挖方式
1	7	方案 2	0.54	强风化 4 m+中风化 4.5 m+微风化	未分步
2			0.54		未分步
3			0.4		未分步
4		方案 1	0.4		强风化岩分步开挖
5			0.3		强风化岩分步开挖
6			0.2		强风化岩分步开挖
7			0.2	中风化 8.5 m+微风化	未分步
8	10	方案 2	0.38	强风化 4 m+中风化 6 m+微风化	未分步
9			0.38		强风化岩分步开挖
10		方案 1	0.3	强风化 5 m+中风化 5 m+微风化	强风化岩分步开挖
11			0.4		强风化岩分步开挖
12			0.5		未分步
13			0.15	中风化 10 m+微风化	未分步

2.2 计算方案

对土层厚度、锚杆布设、灌注桩嵌入岩层中的插入比、岩层组成、开挖方式等不同条件下的多种基坑典型剖面进行数值模拟,具体计算方案如表 3 中所示。

表 3 中灌注桩插入比指的是灌注桩嵌入岩层中的长度与其在土层中长度的比值。岩层开挖方式中,开挖中风化岩层和微风化岩层时均为 1 次性开挖;强风化岩层在某些方案中 1 次性开挖,未分步,在某些方案中,强风化岩层分 2 步开挖完成,第 1 步先开挖其厚度的一半,相应位置上的预应力锚杆施加后再开挖其另一半。

3 基坑开挖地表沉降特征分析

基于数值模拟计算结果,对土岩组合地区“吊脚桩”类型的桩锚支护结构型式的基坑,从以下方面对基坑开挖引起的地表沉降特征进行分析。

3.1 基坑开挖地表沉降模式

图 3,4 分别为计算方案 8 和计算方案 9 中开挖至不同深度处地表沉降曲线和桩体水平位移曲线。对比相应图中桩体水平位移曲线及其对应的地表沉降曲线,可初步判断桩锚结构支护条件下,当桩体水平变形曲线近似上大下小的三角形分布时,基坑地表沉降曲线较光滑,沉降模式为较规则的偏态分布;当桩体水平变形曲线近似为上大下小的梯形分布时,基坑地表沉降曲线光滑性较差,有时存在 2 个极值,成不规则的偏态分布模式。

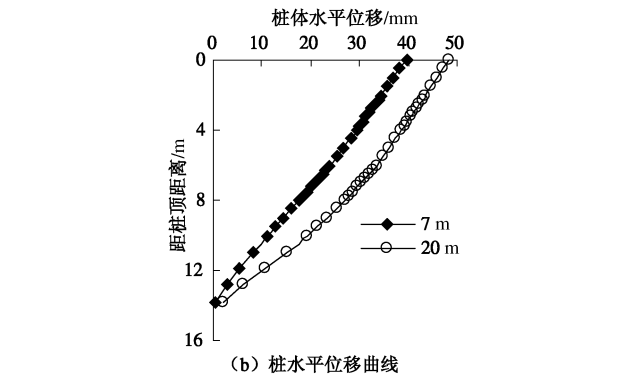
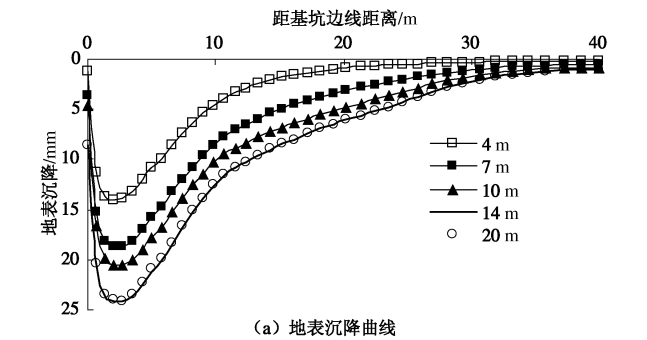


图 3 计算方案 8 中地表沉降及桩体水平位移曲线
Fig. 3 Ground settlement and horizontal displacement curves of pile for analysis scheme 8

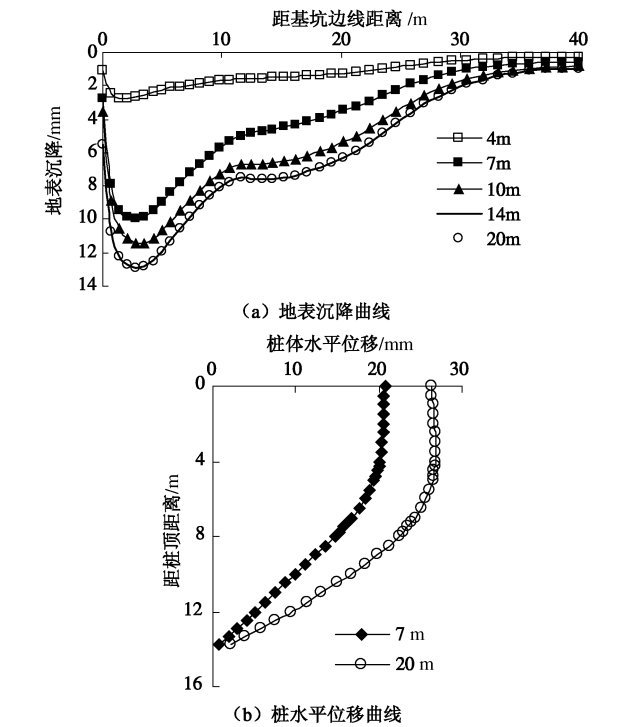


图 4 计算方案 9 中地表沉降及桩体水平位移曲线
Fig. 4 Ground settlement and horizontal displacement curves of pile for analysis scheme 9

表 4 数值计算结果及数据分析表
Table 4 Numerical results and analysis of data

计算方案编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
沉降影响范围 L/m	27	28	29	28	28	29	16	37	37	40	38	37	22
地表最大沉降 s/mm	22.7	9.2	14.2	9.4	10.3	15.9	3.2	24.2	12.9	19.2	16.9	12.8	6.7
最大沉降位置 x/m	2.07	2.07	2.07	1.38	1.38	2.07	1.38	2.76	2.76	2.76	2.92	2.92	2.76
桩最大水平位移 D/mm	50.0	22.6	24.0	22.6	23.5	23.8	8.6	48.0	26.0	31.6	32.4	29.3	13.4
开挖土层沉降 s_1/mm	21.0	8.5	8.6	8.6	9.0	10.0	2.5	20.6	11.5	12.0	11.1	11.0	5.3
L/d	3.9	4.0	4.1	4.0	4.0	4.1	2.3	3.7	3.7	4.0	3.8	3.7	2.2
s/D	0.45	0.41	0.59	0.42	0.44	0.67	0.37	0.50	0.50	0.61	0.52	0.44	0.50
x/d	0.30	0.30	0.30	0.20	0.20	0.30	0.20	0.28	0.28	0.28	0.29	0.29	0.28
$(s-s_1)/\text{mm}$	1.7	0.7	5.6	0.8	1.3	5.9	0.7	3.6	1.4	7.2	5.8	1.8	1.4

注： d 为土层厚度（m）。

3.2 地表沉降与岩土层开挖的关系

表 4 是有限元数值计算结果及相应的数据分析列表，当开挖到基坑底面后的最终地表沉降最大值 s ，与全部土层开挖完成时引起的基坑地表沉降最大值 s_1 之差小于 2 mm 时，即认为岩层的开挖对地表沉降影响较小，可忽略。以此为标准，综合分析表 4 中所示计算结果可知，对于存在强风化岩层且灌注桩仅嵌固于强风化岩层中的基坑而言，当强风化岩层厚 5 m 且灌注桩的插入比 $\lambda \geq 0.5$ 并正常开挖时，则基坑地表沉降主要是由土层开挖引起的，岩层的开挖对基坑地表沉降的贡献较小；当强风化岩层厚 4m 且灌注桩插入比 $\lambda \geq 0.35$ 并正常开挖时，岩层开挖对地表沉降影响不大。

对比计算方案 3, 4 可知，虽然桩的插入比为 0.4，但由于强风化岩层超挖而未按正常顺序开挖，故此时强风化岩层的开挖对基坑地表沉降的影响也较大，方案 3 中因强风化岩层开挖引起的地表沉降最大值的增加量为 5.6 mm。

当基坑地层中不存在强风化岩层时，则只要当灌注桩嵌入中风化层的插入比 $\lambda \geq 0.2$ ，则岩层对地表沉降的影响较小。

对所有计算方案中地表沉降随开挖岩土层性质的变化进行分析可知，当岩层对基坑地表沉降的贡献较大时，主要是由强风化岩层的开挖所致，中风化和微风化岩层的开挖对地表沉降的贡献很小，可以忽略。

综上，为了有效地减小岩层开挖对地表沉降的影响，建议当基坑开挖范围内土层厚度较大（大于 7 m）且存在强风化岩层时，灌注桩宜穿透强风化岩层，当强风化岩层较厚如大于 5 m 时，则灌注桩嵌入强风化岩层中的插入比不宜小于 0.5；当基坑开挖地层仅存在中风化和微风化等性质较好的岩层时，则灌注桩嵌入岩层时其插入比不宜小于 0.2。

3.3 地表沉降影响范围

当距基坑边某水平位置处的地表沉降小于 1 mm 时，即认为基坑开挖对该位置无影响，据此取地表沉降 1 mm 的位置为基坑开挖影响范围的边界，则各计算方案中相应的地表沉降影响范围如表 4 中所示。

由于中风化岩层和微风化岩层的开挖对地表沉降基本无影响，强风化岩层有些条件下影响较小，有些条件下对地表沉降的影响相对较大，故对于这种开挖深度范围内岩层占较大比例的土岩组合型基坑，若采用通常的考虑方式，即以基坑开挖深度的倍数表示地表沉降影响范围，则显然是不适用的，因为并不是基坑开挖深度越深，地表沉降的影响范围就越大。

综合文中各计算方案的分析结果，可知此处取土层的厚度为参照，对基坑开挖地表沉降的影响范围进行分析，具有较好的可操作性，如表 4 中所示，对存在强风化岩层的基坑，基坑开挖影响范围基本为 $4d$ ，即为 4 倍的土层厚度；对于仅有中风化和微风化岩层存在的基坑，其开挖影响范围为 $2.5d$ ，即为 2.5 倍的土层厚度。

3.4 地表沉降最大值及其位置

表 4 中给出了灌注桩最大水平位移 D 、地表最大沉降值 s 及其位置 x ，地表最大沉降位置 x ，即指基坑周边最大地表沉降发生的位置与基坑边线的距离。

如表 4 中所示，当岩层开挖对地表沉降影响较小时，地表最大沉降值与桩体水平位移最大值之比 $s/D = 0.4 \sim 0.5$ ；当岩层开挖对地表沉降影响较大时，地表最大沉降值与桩体水平位移最大值之比 $s/D = 0.5 \sim 0.7$ 。

无论岩层开挖对地表沉降的影响如何，地表沉降最大值发生的位置 x 均相差不大，其与相应基坑土层厚度的比值也相对集中，即有 $x/d = 0.2 \sim 0.3$ 。

4 结 论

通过数值模拟计算，对桩锚结构的“吊脚桩”类

支护结构下土岩组合基坑的地表沉降特征进行了分析, 主要得到以下 5 点结论。

(1) 当桩体水平变形曲线近似上大下小的三角形分布时, 基坑地表沉降曲线较光滑, 沉降模式为较规则的偏态分布; 当桩体水平变形曲线近似为上大下小的梯形分布时, 基坑地表沉降曲线的光滑性较差, 有时存在 2 个极值, 成不规则的偏态分布模式。

(2) 为了有效地减小岩层开挖对地表沉降的影响, 当土层厚度较大时, 灌注桩宜穿透强风化岩层, 当强风化岩层较厚如大于 5 m 时, 则灌注桩嵌入强风化岩层中的插入比不宜小于 0.5; 当基坑开挖地层中仅存在中风化和微风化等性质较好的岩层时, 灌注桩嵌入岩层时其插入比不宜小于 0.2。

(3) 对存在强风化岩层的基坑, 基坑开挖影响范围基本为 4 倍土层厚度; 对于仅有中风化和微风化岩层存在的基坑, 其开挖影响范围为 2.5 倍土层厚度。

(4) 当岩层开挖对地表沉降影响较小时, 地表沉降最大值与桩体水平位移最大值之比为 0.4~0.5; 反之, 地表沉降最大值与桩体水平位移最大值之比为 0.5~0.7。

(5) 地表沉降最大值发生的位置与相应基坑土层厚度的比值相对集中, 基本为 0.2~0.3。

以上是对青岛地区典型土岩组合基坑在桩锚支护结构条件下计算分析得到的结果, 与软土地区基坑开挖地表沉降特征具有明显差异, 这些结论对类似岩土层性质及基坑支护结构条件的基坑工程具有较好的参考价值, 当岩层尤其是强风化岩的岩层性质及厚度与文中相差较大时, 应做进一步具体分析。

参考文献:

[1] 聂宗泉, 张尚根, 孟少平. 软土深基坑开挖地表沉降评估

方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1218 - 1223. (NIE Zong-quan, ZHANG Shang-gen, MENG Shao-ping. Surface settlement of deep foundation pits by excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1218 - 1223. (in Chinese))

[2] 杨 敏, 卢俊义. 基坑开挖引起的地面沉降估算[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1821 - 1828. (YANG Min, LU Jun-yi. Estimation of ground settlement aroused by deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(12): 1821 - 1828. (in Chinese))

[3] 应宏伟, 杨永文. 杭州深厚软黏土中某深大基坑的性状研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(12): 1838 - 1846. (YING Hong-wei, YANG Yong-wen. Characteristics of a large and deep soft clay excavation in Hangzhou[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(12): 1838 - 1846. (in Chinese))

[4] 李明瑛, 曾 朋. 基于 MIDAS 深基坑桩锚支护数值模拟分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19 (1): 250 - 253. (LI Ming-ying, ZENG Peng. Numerical simulation analysis of pile-anchor retaining in deep foundation based on MIDAS[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(1): 250 - 253. (in Chinese))

[5] 刘红军, 李 东, 孙 涛, 等. 二元结构岩土基坑“吊脚桩”支护设计数值分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(5): 43 - 48. (LIU Hong-jun, LI Dong, SUN Tao, et al. Numerical analysis on design of dualistic foundation pit with ‘end-suspended pile’[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31(5): 43 - 48. (in Chinese))

(本文责编 孙振远)