

引文格式:杨晓华,张天阳,王志丰. 富水砂层深基坑桩锚支护参数对邻近城市道路的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2025, 42(1): 157-166.  
YANG Xiaohua, ZHANG Tianyang, WANG Zhifeng. Influence of pile-anchor supporting parameters of deep foundation pit in water-rich sand layer on adjacent urban roads[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2025, 42(1): 157-166.

DOI:10.19815/j.jace.2023.05102

# 富水砂层深基坑桩锚支护参数对邻近城市道路的影响

杨晓华, 张天阳, 王志丰

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**为了减小基坑开挖对邻近城市道路的影响,提高支护结构的安全性,避免过大的安全冗余,以实际工程为背景,采用FLAC3D软件建立桩-土-道路荷载共同作用的数值模型,通过与现场监测数据对比验证了模型的准确性,在此基础上分析了围护桩桩径、嵌固深度、锚索锚固段长度及预应力参数变化对围护结构及邻近道路变形特性的影响。结果表明:原支护桩参数相对保守,在满足基坑稳定性要求的前提下,桩径0.8 m、嵌固深度7.5 m仍能满足道路沉降控制值要求;提升桩径和嵌固深度能有效抑制围护结构及道路变形,当嵌固深度提升至8.5 m后对基坑变形的控制效果提升不明显;该场地条件下锚索的临界锚固段长度约为12 m,锚固段长度提升对基坑外5~30 m道路范围内的沉降控制效果显著;在围护桩桩径0.8 m、嵌固深度7.5 m的条件下,预应力值在150~250 kN范围内每提升50 kN,各锚固段长度下桩体深层水平位移减小率均在同一水平(约10%);各工况下邻近道路最大沉降点出现位置与桩锚参数有关,随着围护结构变形引起的道路沉降占比逐渐减小和道路荷载引起的道路沉降占比逐渐增大,道路最大沉降发生位置有从道路邻近基坑侧边缘向道路中心移动的趋势;研究成果可以为类似工程提供参考。

**关键词:**基坑;桩锚支护;邻近道路;优化分析;数值模拟

中图分类号: TU463

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2025)01-0157-10

## Influence of pile-anchor supporting parameters of deep foundation pit in water-rich sand layer on adjacent urban roads

YANG Xiaohua, ZHANG Tianyang, WANG Zhifeng

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

**Abstract:** In order to reduce the influence of foundation pit excavation on adjacent urban roads, improve the safety of supporting structure and avoid excessive safety redundancy, a numerical model of pile-soil-road load interaction was established by FLAC3D software based on the actual project. The accuracy of the model was verified by comparing with the field monitoring data. On this basis, the influence of pile diameter, embedded depth, anchor length and prestress parameters on the deformation behavior of retaining structure and adjacent roads was analyzed. The results show that the parameters of the original supporting pile are relatively conservative. Under the premise of meeting the stability requirements of the foundation pit, the pile diameter of 0.8 m and the embedded depth of 7.5 m can still meet the requirements of the road settlement

收稿日期: 2023-05-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178310)

作者简介: 杨晓华(1961-),男,工学博士,教授,博士生导师, E-mail: xiaohuay@126.com。

control value. The increase of pile diameter and embedded depth can effectively inhibit the deformation of retaining structure and road. When the embedded depth is increased to 8.5 m, the control effect of foundation pit deformation is not obvious. For this site, the critical anchorage length of the anchor cable is about 12 m, and the increase of the anchorage length has a significant effect on the settlement control within the road range of 5-30 m outside the foundation pit. Under the condition that the retaining pile diameter is 0.8 m and the embedded depth is 7.5 m, for every 50 kN increase of the prestress value in the range of 150-250 kN, the reduction rate of the deep horizontal displacement of the pile under each anchorage length is at the same level (about 10%). The location of the maximum settlement point of the adjacent road under each working condition is related to the pile anchor parameters. As the proportion of road settlement caused by the deformation of the retaining structure gradually decreases and the proportion of road settlement caused by road load gradually increases, the location of the maximum settlement of the road tends to move from the side edge of the adjacent foundation pit to the center of the road. The research findings can provide reference for similar projects.

**Key words:** foundation pit; pile-anchor support; adjacent road; optimization analysis; numerical simulation

**Author resume:** YANG Xiaohua(1961-), male, PhD, professor, E-mail: xiaohuay@126.com.

## 0 引言

随着城市化进程的加快,土地资源日趋紧张,许多市政设施由地上转到地下,朝着地下更大更深的方向发展。在道路交互的人口密集地区,新建基坑往往邻近已有建筑物或交通设施<sup>[1]</sup>。由于基坑开挖引起的土体位移容易造成周围管线、道路、建筑物破坏<sup>[2-3]</sup>,因此在保证基坑安全的同时维持邻近既有道路正常通行是当前面临的主要问题之一。

Schuster 等<sup>[4]</sup>基于大量的基坑变形实测数据,首次提出了基坑外地表沉降主要影响区域和次要影响区域的概念,总结了不同土体类型对应的一般地表沉降曲线形式和沉降预测方法。张莎莎等<sup>[5]</sup>通过数值模拟对基坑开挖过程中邻近既有盾构隧道的位移及纵向隆起变形进行了研究。徐宏增等<sup>[6]</sup>以某狭长形基坑为背景,运用 PLAXIS 有限元软件研究了不同围护结构对邻近地下大直径管线的影响,分析得出通过提高围护结构刚度可以大幅减小邻近管线的位移。张超翔等<sup>[7]</sup>对比分析了桩锚支护的基坑开挖过程中实测数据与模拟结果的偏差,总结了造成数值偏差的原因。周中等<sup>[8]</sup>采用 MIDAS/GTS 有限元数值模拟的方法分析了邻近高层建筑的基坑地连墙支护结构的变形特性,发现地表沉降最大点出现在地连墙和建筑物之间,并随着开挖的进行向地连墙方向移动。胡斌等<sup>[9]</sup>以武汉地铁某车站深基坑为背景,将现场监测、数值模拟、BP 神经网络预测多

方法结合分析了基坑围护结构变形及基坑开挖对上跨桥墩的影响,发现计算结果与监测结果相近,工程设计方案偏保守。刘勇等<sup>[10]</sup>通过现场实测数据不断修正数值模拟的参数,得到了与实际监测结果相近的数值模拟预测值,为检验基坑设计理论和方法的正确性提供了依据。郑刚等<sup>[11-12]</sup>研究了不同围护结构变形模式对基坑外深层土体位移场的影响范围,对既有隧道变形的影响进行分析,并对最大水平位移条件下隧道变形影响区进行了划分。周鹏等<sup>[13]</sup>对 3 个不同地质条件和开挖深度的基坑邻近道路的沉降监测结果进行了分析,发现邻近道路沉降主要受道路和基坑的空间位置影响,沉降主要发生在基坑开挖至底板浇筑完成期间。雷华阳等<sup>[14]</sup>研究了基坑开挖对滩涂铁路路基的影响,通过有限元分析发现,危险工况下增加支撑对基坑的加固效果最佳。陈云钢等<sup>[15]</sup>运用 ABAQUS 有限元软件对邻近铁路路基基坑进行研究,发现铁路路基沉降主要发生在开挖中期,开挖时适当增加中部锚索预应力可显著提升支护效应。李向群等<sup>[16]</sup>根据现场实时监测数据分析发现,与基坑的距离和地层土质条件是影响周边地表沉降的主要因素。

从近年来的一些代表性研究可以看出,目前基坑开挖对邻近道路及建筑物变形的影响研究已经相对完善,但针对复杂地质条件下基坑开挖支护参数改变产生的影响研究还相对欠缺,尤其是高地下水位高透水性地层基坑开挖时对围护结构参数的合理

性要求更高,需重点关注。基于此,本文以实际工程为背景,运用 FLAC3D 数值模拟软件<sup>[17]</sup>研究了富水砂层中深基坑桩锚支护参数变化对邻近城市道路的影响,并与现场监测数据进行对比,验证了所建立数值模型的准确性,以期为类似工程提供参考。

## 1 工程概况及工程地质条件

### 1.1 工程概况

本研究以某雨水泵站深基坑项目为背景,拟建基础外边线尺寸为 30 m×25 m,基坑底面深度为 12.5 m,标高 358.0 m,预计泵站基础埋深约 13.5 m;基坑平面布置如图 1 所示,基坑上口边缘距离邻近城市主干道 5 m,在基坑外 2 m 处沿基坑中线的道路范围内每 3 m 布置一个沉降监测点,在基坑四角及每侧中点处各布置一个测斜孔。施工期间邻近道路保持正常通行,支护结构变形对道路影响较大,依据规范<sup>[18]</sup>该基坑支护等级为一级。初始支护参数如图 2 所示,其中  $L$  为锚索长度,  $L_m$  为锚固段长度,  $T_p$  为锚索预应力。

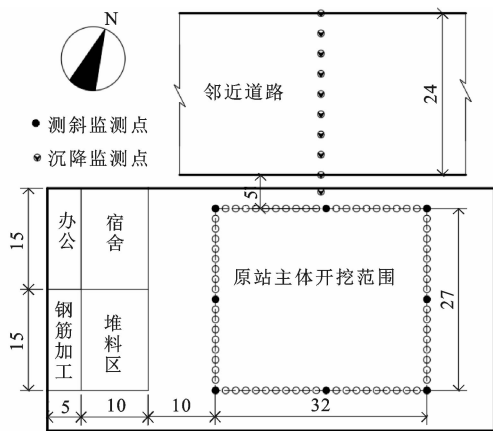


图1 基坑平面布置(单位:m)

Fig.1 Foundation pit layout (unit:m)

### 1.2 水文及地质条件

依据地质勘察报告,本场地的地下水稳定水位标高为 364.94~365.19 m,属于潜水类型,地下水补给来源主要为大气降水和渭河侧向径流。本工程±0.000 m 相对于绝对标高 370.00 m,地面下约 5.0 m 会遇到地下水。

拟建场地地貌单元为渭河河漫滩。地面高程介于 369.7~370.2 m 之间,地形平坦,相对高差约 0.5 m。该区域地层 20 m 深度范围内自上而下依次为填土、黄土状土及中砂,按层分述如下:①填土,平均厚度 0.5 m,以耕植土和素填土为主,局部为杂填土,土质不均,含少量砖瓦、砾石、建筑垃圾等,结

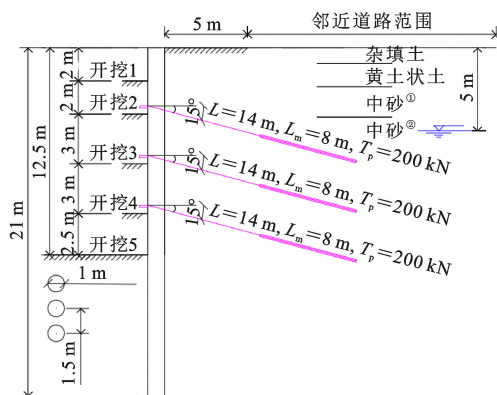


图2 基坑邻近道路段围护结构剖面图

Fig.2 Section of retaining structure of foundation pit adjacent to road section

构松散;②黄土状土,平均厚度 1.0 m,土质欠均,大孔发育,可见虫孔、虫粪和植物根茎等,中等压缩性(个别土样具有高压缩性),具有湿陷性;③中砂①,平均厚度 2.0 m,灰黄色,含有少量黏性土,呈稍湿稍密状态,局部相变为细砂;④中砂②,灰黄色,主要矿物成分为石英长石,颗粒均匀,级配不良,呈饱和、密实状态,地下稳定水位位于本层上部。

## 2 数值模型及参数

### 2.1 计算模型

根据经验在基坑深度方向取 4 倍的开挖深度,水平向取 5 倍的开挖深度,认为计算模型的尺寸相对于基坑尺寸无限大,可以忽略尺寸效应带来的影响,因此将模型除顶面外的前后左右和底面 5 个面分别赋予法向约束<sup>[19]</sup>。实际施工过程中,在基坑周围并没有固定超载,偏安全考虑,在基坑上口外边缘施加  $q=15$  kPa 的均布荷载用以模拟基坑周围随机产生的机械荷载和施工堆载,在基坑外道路范围内施加  $q=20$  kPa 的均布荷载用以模拟道路车辆荷载。几何模型原点位于基坑开挖面中心地面位置,根据已有研究经验,围护结构的空间效应明显,基坑中段接近二维受力状态,此处约束较弱、变形最大,为节约计算成本,选取基坑邻近道路一侧中段进行分析,采用平面应变条件和半对称性建立如图 3 所示的 1/2 边坡模型进行模拟,并对基坑坑底及桩后一定范围内网格进行加密。模型长 83.6 m,宽 6 m,高 50 m,包含 9 120 个实体单元和 11 895 个网格节点。

### 2.2 土体本构模型及参数选取

采用常规的理想弹塑性本构模型进行数值计算时通常可以得到理想的水平向变形结果,但很难准

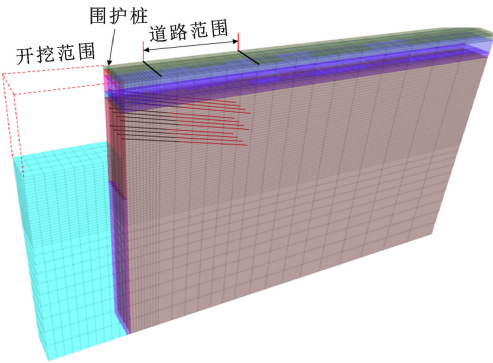


图3 基坑模型

Fig. 3 Foundation pit model

确预测开挖基坑附近的地表沉降<sup>[20]</sup>。本文选用土的塑性硬化模型进行计算,该模型破坏准则基于摩尔库伦强度理论,但能够同时考虑土体的剪切硬化和体积硬化特征,消除了原始非线性弹性模型不能区分土体加载和卸载刚度的一些缺陷<sup>[21]</sup>。结合相关研究和已有资料对土体计算参数进行取值,如表

表1 基坑开挖范围内土体计算参数

Table 1 Calculation parameters of soil in excavation range of foundation pit

地层土体	厚度/m	天然重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $c$ /kPa	内摩擦角 /( $^{\circ}$ )	泊松比 $\mu$	割线模量 $E_{50}^{\text{ref}}$ /MPa	幂指数 $m$	卸载/再加载模量 $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ /MPa
杂填土	0.5	1 600	16.0	19	0.2	4.80	0.5	48
黄土状土	1.0	1 650	21.5	21	0.2	6.28	0.5	64
中砂 <sup>①</sup>	2.0	1 850	1.0	30	0.2	25.0	0.5	150
中砂 <sup>②</sup>		2 000	0.0	31	0.2	27.0	0.5	162

表2 锚索主要计算参数

Table 2 Main calculation parameters of anchor cable

锚索排号	成孔直径/mm	极限黏结强度/kPa	水平间距/m	竖向间距/m	锚固角度 /( $^{\circ}$ )	弹性模量/GPa	泊松比 $\mu$
1	150	150	1.5	3.5	15	210	0.35
2	150	150	1.5	3.5	15	210	0.35
3	150	150	1.5	3.5	15	210	0.35

2.3 地下水处理方案

在高地下水位地区,基坑降水是引起围护结构变形和周围地表沉降的主要原因之一<sup>[23]</sup>。基坑降水使降水范围内土体有效应力增大,土体抗剪强度也相应增加。对于深厚砂层,由于土层具有较强的透水性,降水对砂性土强度参数的提升不明显<sup>[24]</sup>,因此该模型在不配置流体分析的条件下进行计算。桩间设置与桩等长的水泥土搅拌桩用作止水帷幕,设置为不透水边界。假定基坑外地下水位不发生改变,孔隙水压力由FLAC3D软件自动初始化,通过将开挖区域的饱和度、孔隙水压力和渗透率设置为0,实现基坑内降水,分3次将基坑内地下水位降至地面下8、11、13.5 m。

降水引起的基坑沉降见图4,止水帷幕将坑内

1所示。

考虑到排桩支护结构在桩间距较小时冠梁和腰梁能够在桩间传递部分剪力和弯矩,依照规范<sup>[18]</sup>将排桩结构按照式(1)等刚度的原则简化为一定厚度的连续墙,从而达到简化计算的效果。在桩土实体单元间设置接触面单元模拟桩土间的相对滑动行为<sup>[22]</sup>,相比于结构单元,实体单元所需的物理参数较少,更能真实反映桩土间的相互作用,接触面的摩擦角取 $20^{\circ}$ 。灌注桩泊松比为0.15,弹性模量取30 GPa。锚索采用二次压力注浆,用Cable单元模拟,锚索结构主要计算参数见表2。

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{12}(D+t)h^3 &= \frac{1}{64}\pi D^4 \\ h &= 0.838D \sqrt[3]{\frac{1}{1+t/D}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $D$ 为桩的直径; $t$ 为桩间净距; $h$ 为桩体等效刚度,即等效地连墙厚度。

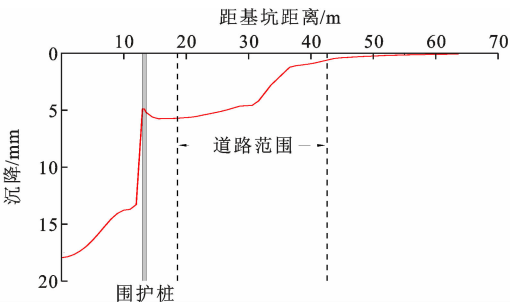


图4 降水引起的基坑沉降

Fig. 4 Settlement of foundation pit caused by drainage

和坑外沉降曲线分割形成两个沉降漏斗,其中坑内沉降值显著大于坑外沉降值;基坑降水引起基坑中心最大沉降为18 mm,基坑外最大沉降为5.8 mm,基坑外沉降沿着远离基坑中心方向逐渐减小至0。

2.4 基坑开挖方案

在邻近道路范围内施加 20 kPa 的均布荷载用以模拟车辆荷载,在基坑外 0~5 m 范围内施加 15 kPa 的均布荷载用以模拟施工过程中随机产生的堆载和施工机械荷载并进行初始地应力场平衡,激活围护桩再次求解平衡。开挖和支护步骤为:

- (1)模拟土体第 1 次开挖,悬臂开挖至地面下 2 m。
- (2)模拟土体第 2 次开挖,悬臂开挖至地面下 4 m 处,在距离地面 3.5 m 处施加第 1 排锚索,并施加预应力。
- (3)模拟土体第 3 次开挖,开挖至地面下 7 m 处,在距离地面 6.5 m 处施加第 2 排锚索,并施加预应力。
- (4)模拟土体第 4 次开挖,开挖至地面下 10 m 处,在距离地面 9.5 m 处施加第 3 排锚索,并施加预应力。
- (5)模拟土体第 5 次开挖,开挖至地面下 12.5 m 处。

2.5 模型验证分析

在研究桩锚支护参数改变对邻近道路的影响之前,先对模型准确性进行验证。选取开挖完成后基坑邻近道路侧中段测斜数据和道路沉降监测数据与数值计算结果进行对比分析,结果如图 5、6 所示。

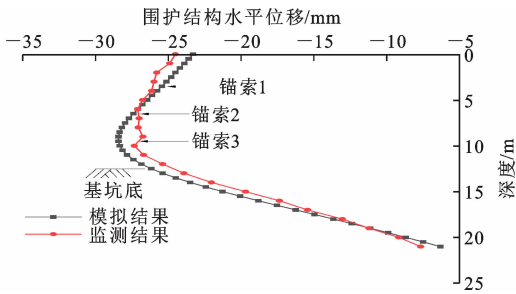


图 5 桩体水平位移计算值与实测值对比

Fig. 5 Comparison between calculated and measured horizontal displacement of pile

桩体水平位移监测结果离散性较大但与模拟结果吻合度较高:实测与模拟的最大水平位移均发生在坑底附近,桩身整体形态都呈“鼓肚”形;桩体最大水平位移实测值与模拟值分别为 27.3、28.4 mm,两曲线最大值相差 6.3%;除桩体上部部分区段的实测结果大于计算结果外,其余大部分区段的实测结果均小于计算结果,主要原因为计算过程中假定基坑外地下水位保持不变,从而高估了作用在围护结构上的水压力。桩顶处水平位移大于计算值的可能原因是实际施工过程中后两排锚索张拉造成第一

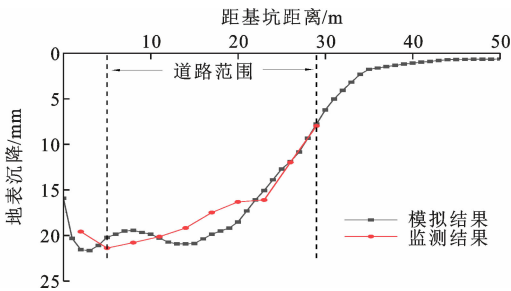


图 6 地表沉降计算值与实测值对比

Fig. 6 Comparison of calculated and measured surface settlement

排锚索松弛,从而降低了第一排锚索对桩体变形的控制性能。

实测与模拟最大沉降分别为 21.40、21.68 mm,均发生在距离基坑 3~5 m 范围内;基坑外地表沉降曲线整体形状均呈勺形,实测结果与考虑降水影响的模拟计算结果较为吻合。图 6 中道路范围内现场监测结果相比计算结果沉降分布更均匀,监测结果大部分小于计算结果,除上述降水计算条件因素影响外,推测是由于道路结构具有一定的强度以及在长期车辆荷载下道路工作区范围内土体强度增大<sup>[25]</sup>、抵抗变形的能力增强导致。

总体而言,围护结构水平位移与地表沉降的监测结果和模拟计算结果变化规律基本一致,表明本文所建立的模型及选取的参数较为合理。

3 桩锚支护参数影响分析

在保证基坑自身稳定性的前提下,通过改变桩锚参数研究支护参数对邻近道路的影响。基坑监测变形监控指标如表 3 所示<sup>[26]</sup>。

表 3 基坑监测变形监控指标

Table 3 Foundation pit monitoring deformation monitoring index

监测项目	控制值	预警值
桩顶水平位移/mm	30	24
桩身深层水平位移/mm	40	32
道路沉降/mm	30	24

3.1 围护桩参数影响分析

围护桩的桩长和桩径是围护结构设计中的重要参数。由于场地砂层较厚,桩端未能嵌入坚硬岩层,因此嵌固深度将直接影响支护结构的水平位移并对周围道路的变形产生影响。由监测结果可知,支护桩的初始支护条件相对保守,因此保持锚索参数不变,分别在桩径为 0.6、0.8、1.0 m(原桩径)条件下设置桩体嵌固深度为 5.5、6.5、7.5、8.5(原嵌固深



度)、9.5 m 进行计算,开挖完成后的围护桩水平位移如图 7~9 所示,基坑外地表及道路沉降曲线如图 10~12 所示。

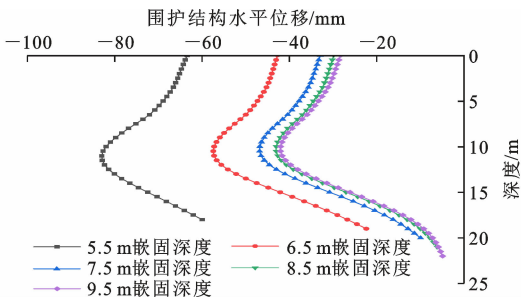


图 7 0.6 m 桩径条件下各嵌固深度桩体水平位移  
Fig. 7 Horizontal displacement of pile at each embedment depth under condition of 0.6 m pile diameter

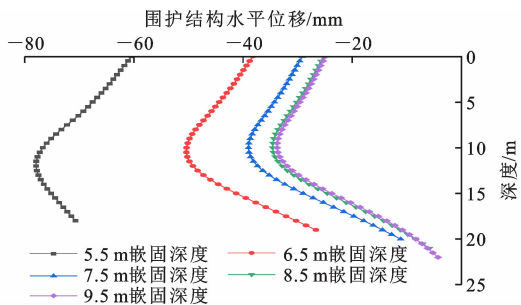


图 8 0.8 m 桩径条件下各嵌固深度桩体水平位移  
Fig. 8 Horizontal displacement of pile at each embedment depth under condition of 0.8 m pile diameter

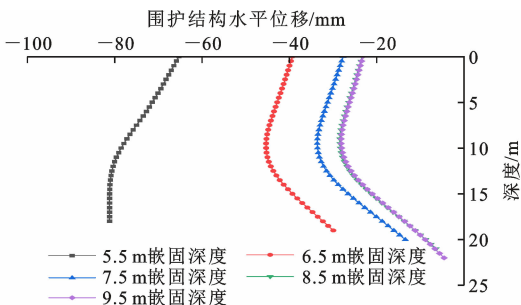


图 9 1.0 m 桩径条件下各嵌固深度桩体水平位移  
Fig. 9 Horizontal displacement of pile at each embedment depth under condition of 1.0 m pile diameter

由计算结果对比分析可知:嵌固深度为 5.5 m 时,桩径为 1 m 条件下围护桩最大水平位移出现在桩底,发生踢脚破坏;桩径为 0.8 m 和 0.6 m 条件下最大水平位移出现在桩身,虽未发生踢脚破坏但整体位移较大,显著超出变形控制值。各桩径对应的其余各嵌固深度桩身变形形态相同,均表现为中间大、两端小的鼓肚形。3 种桩径条件下围护桩水平位移和基坑外地表沉降均随着嵌固深度的增大而减小,桩径 0.6 m 时不同嵌固深度(6.5、7.5、8.5、

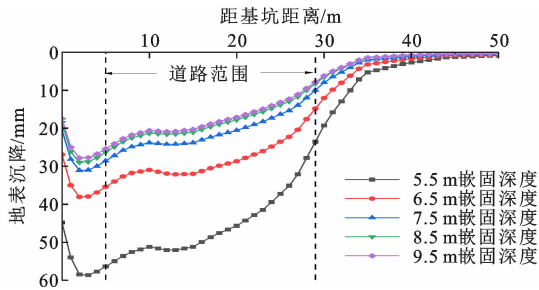


图 10 0.6 m 桩径条件下各嵌固深度地表沉降  
Fig. 10 Surface settlement at each embedment depth under condition of 0.6 m pile diameter

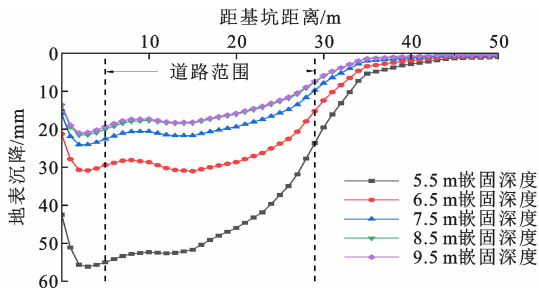


图 11 0.8 m 桩径条件下各嵌固深度地表沉降  
Fig. 11 Surface settlement at each embedment depth under condition of 0.8 m pile diameter

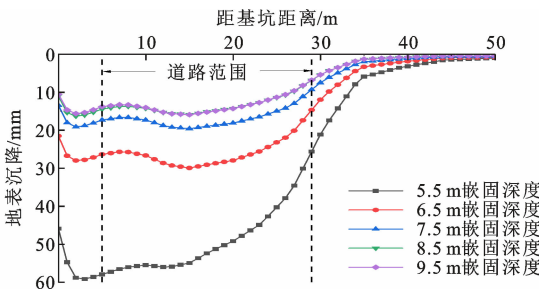


图 12 1.0 m 桩径条件下各嵌固深度地表沉降  
Fig. 12 Surface settlement at each embedment depth under condition of 1.0 m pile diameter

9.5 m)相比嵌固深度最小值(5.5 m)的最大水平位移减小率分别为 30.79%、18.48%、8.09%、2.35%;桩径 0.8 m 对应最大水平位移减小率分别为 35.37%、22.61%、11.34%、2.34%;桩径 1.0 m 对应最大水平位移减小率分别为 44.20%、25.92%、15.40%、1.06%。当嵌固深度超过 8.5 m 后,再增大嵌固深度对围护结构变形与基坑外地表和道路沉降的控制效果提升不大。

在不改变配筋的条件下,桩径及桩间距改变的实际上是围护结构的整体抗弯刚度。除嵌固深度为 5.5 m 的工况外,其余工况嵌固深度相同时桩身水平位移与基坑外地表沉降均随着桩径增大而减小。桩径为 0.6 m 时围护桩表现出明显的柔性,围护桩

整体以弯剪变形为主;在主动土压力与锚索的共同作用下桩身整体变形呈凸形,由此可知围护桩抗弯刚度较小时锚索的作用更显著。随着桩径增大,桩身弯曲变形比例逐渐减小,桩身整体变形形式逐渐转变为转动变形。桩体各部分过大的变形差可能导致桩体和桩间水泥土搅拌桩开裂,引发基坑侧壁渗水等问题,因此实际工程中除了关注桩体的最大变形外还应考虑桩体各部分的协调变形。

由图 10 可知,在 0.6 m 桩径条件下道路最大沉降均发生在道路邻近基坑一侧,且有随着桩径增大向道路中心移动的趋势。考虑降水引起的基坑外沉降,将基坑降水引起的基坑外沉降与基坑开挖引起的基坑外沉降累加发现:桩径 0.6 m 时各嵌固深度条件下围护结构深层水平位移均不能满足表 3 的控制值要求;桩径为 0.8 m 和 1.0 m 时,嵌固深度为 7.5、8.5、9.5 m 时均能满足表 3 的控制值要求。

### 3.2 锚索参数影响分析

在原锚索参数条件下,桩径 0.8 m、桩身嵌固深度 7.5 m 相较于原支护桩参数更加经济合理,但桩体最大水平位移及道路沉降已经超过预警值。考虑到基坑施工过程中的诸多不确定因素,在桩径 0.8 m、嵌固深度 7.5 m 的条件下改变锚索参数进行分析。依照规范<sup>[18]</sup>,锚杆预应力值宜取锚杆轴向拉力标准值的 0.75 倍~0.9 倍,分别计算预应力 150、200 kN(原预应力)条件下锚固段长度 6(规范建议最小锚固段长度)、8(原锚固段长度)、10、12、14、16 m 以及预应力 250 kN 条件下锚固段长度 8、10、12、14、16 m 对应基坑开挖完成后的围护桩水平位移和基坑外地表及道路沉降变化情况,计算结果如图 13~18 所示。

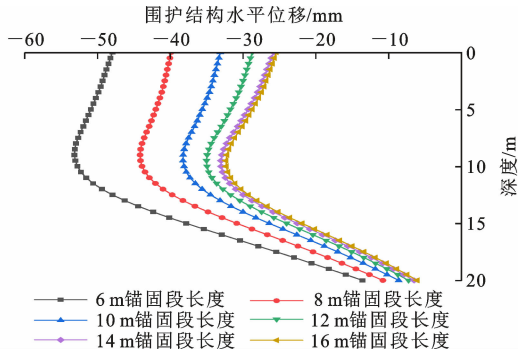


图 13 预应力 150 kN 下各锚固段长度的桩体水平位移  
Fig. 13 Horizontal displacement of pile of each anchorage length under 150 kN prestress

分析可知,在相同预应力条件下,随着锚固段长度的增大,桩身整体水平位移逐渐减小,桩体变形形

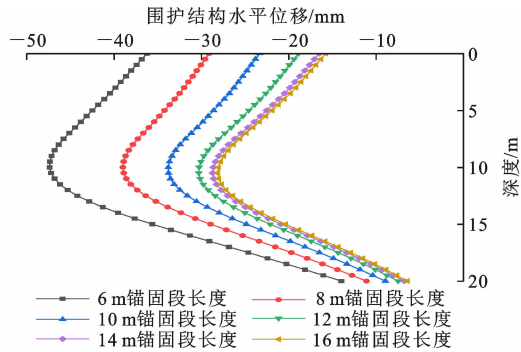


图 14 预应力 200 kN 下各锚固段长度的桩体水平位移  
Fig. 14 Horizontal displacement of pile of each anchorage length under 200 kN prestress

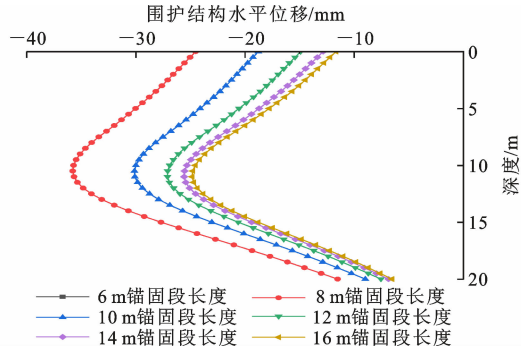


图 15 预应力 250 kN 下各锚固段长度的桩体水平位移  
Fig. 15 Horizontal displacement of pile of each anchorage length under 250 kN prestress

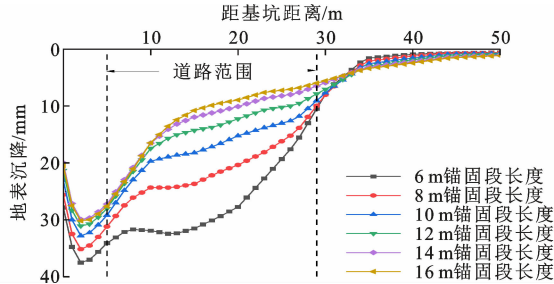


图 16 预应力 150 kN 下各锚固段长度的地表沉降  
Fig. 16 Surface settlement of each anchorage length under 150 kN prestress

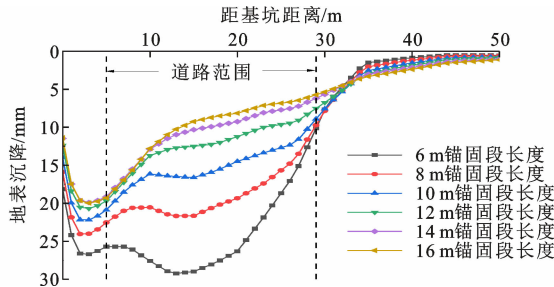


图 17 预应力 200 kN 下各锚固段长度的地表沉降  
Fig. 17 Surface settlement of each anchorage length under 200 kN prestress

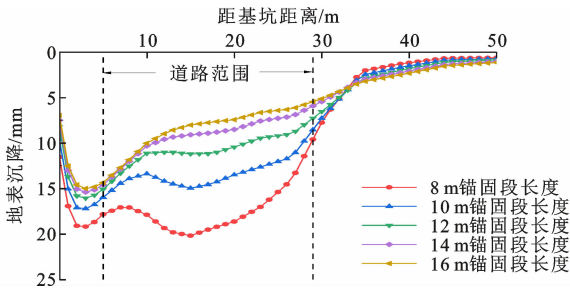


图 18 预应力 250 kN 下各锚固段长度的地表沉降  
Fig. 18 Surface settlement of each anchorage length under 250 kN prestress

态基本不发生改变;随着锚固段长度增大,锚索对土体变形的约束范围逐渐增大,基坑外最大沉降逐渐减小,距离基坑 5~30 m 的道路范围内沉降减小显著,可见道路沉降受锚固段长度影响较大。3 种预应力条件下增大锚固段长度围护桩最大水平位移减小规律一致:锚固段长度由图中最小值逐步增大至最大值,预应力为 150 kN 时不同锚固段长度相比锚比段长度最小值的对应最大水平位移减小率为 16.95%、13.38%、8.45%、5.69%、2.07%;预应力为 200 kN 时对应最大水平位移减小率为 17.71%、13.33%、10.35%、5.26%、1.97%;预应力为 250 kN 时对应最大水平位移减小率为 15.8%、10.06%、5.61%、2.88%。临界长度理论<sup>[27]</sup>认为当锚固段长度达到一定值后,继续增大锚固段长度对减小基坑水平位移及基坑外道路沉降效果不明显,由计算结果可知该场地临界锚固段长度在 12 m 左右。

随着预应力增大,在相同锚固段长度条件下围护桩水平位移与基坑外沉降均有一定程度的减小,预应力由 150 kN 增大至 200 kN,锚固段长度为 6、8、10、12、14、16 m 对应的最大水平位移减小率分别为 10.83%、11.64%、11.59%、13.42%、13.02%、12.93%;预应力由 200 kN 增大至 250 kN,锚固段长度为 8、10、12、14、16 m 对应的最大水平位移减小率分别为 8.27%、10.89%、10.60%、10.94%、11.76%。在各锚固段长度条件下,将预应力由 250 kN 增大至 300 kN 和 350 kN,对应最大水平位移减小率均在同一水平;随着预应力增大,基坑外地表和道路的最大沉降逐渐减小,与桩身水平位移的变化规律一致;预应力增大使距离基坑较近范围内的沉降得到显著控制,而距离基坑稍远位置的沉降减小不明显。适当提升预应力能改善支护结构的受力特性,起到节省工程开支的作用,但过大的预应力可能会导致锚索发生拔出破坏,因此预应力应根据现场地层特性以及支护结构变形控制要求确定。

在桩径 0.8 m、嵌固深度 7.5 m 条件下考虑降水引起的基坑外沉降,将基坑降水引起的基坑外沉降与模拟计算结果累加,发现预应力为 150 kN 时基坑外道路沉降值均不能满足控制值要求,道路最大沉降点均出现在道路邻近基坑一侧;预应力为 200 kN 和 250 kN 条件下,除预应力 200 kN 锚固段长度为 6 m 的工况外,其余各工况均能满足表 3 的控制值要求,两种预应力条件下道路最大沉降点发生位置均随着锚固段长度减小由道路临近基坑侧边缘逐步转移至道路中心位置。

4 结 语

(1)嵌固深度为 5.5 m、桩径为 1 m 时围护桩会发生踢脚破坏,桩径为 0.6 m 和 0.8 m 条件下则表现为整体位移较大;本场地砂土层较厚,应保证足够的嵌入深度以避免发生踢脚破坏;0.6 m 桩径条件下所有工况均不能满足控制值要求,提升桩径和嵌固深度能有效抑制围护结构变形,当嵌固深度提升至 8.5 m 后对基坑变形的控制效果不明显。在原锚索参数条件下,围护桩嵌固深度 7.5 m、桩径为 0.8 m 仍能满足基坑变形控制值要求,相比原支护参数更加经济合理。

(2)桩径 0.8 m、围护桩嵌固深度 7.5 m 条件下锚固段长度的改变对地表沉降曲线形态影响显著,其中基坑外 5~30 m 道路范围内受锚固段长度影响最明显;在 150~250 kN 范围内增大预应力,各锚固段长度下桩身水平位移减小率均在同一水平,预应力每提升 50 kN,桩体深层水平位移减小约 10%;该场地锚固段长度临界值约为 12 m,超过该值对基坑变形控制效果提升不明显。

(3)道路最大沉降发生位置受围护桩的桩径、锚索的预应力及锚固段长度影响;随着桩径、锚索预应力的增大及锚固段长度的减小,由围护结构变形引起的基坑外沉降占比逐渐减小,车辆荷载引起的沉降占比逐渐增大,道路最大沉降点位置有从道路邻近基坑一侧向道路中心移动的趋势。

(4)基坑围护结构变形和地表沉降变形的实测结果与模拟计算结果具有较强的一致性,验证了模型的有效性和所取参数的合理性,可为类似工程的围护结构变形控制及参数优化提供一定的参考。

参考文献:

References:

[1] 孙 超,郭浩天.深基坑支护新技术现状及展望[J].



- 建筑科学与工程学报,2018,35(3):104-117.
- SUN Chao, GUO Haotian. Present situation and prospect of new technology for deep foundation pit support[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(3): 104-117.
- [2] 郑刚,朱合华,刘新荣,等.基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J].土木工程学报,2016,49(6):1-24.
- ZHENG Gang, ZHU Hehua, LIU Xinrong, et al. Control of safety of deep excavations and underground engineering and its impact on surrounding environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(6): 1-24.
- [3] 张旷成,李继民.杭州地铁湘湖站“08.11.15”基坑坍塌事故分析[J].岩土工程学报,2010,32(增1):338-342.
- ZHANG Kuangcheng, LI Jimin. Analysis of “08.11.15” foundation pit collapse accident in Xianghu station of Hangzhou metro [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 338-342.
- [4] SCHUSTER M, KUNG G T C, JUANG C H, et al. Simplified model for evaluating damage potential of buildings adjacent to a braced excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(12): 1823-1835.
- [5] 张莎莎,苏焰花,樊林,等.基坑开挖对邻近既有盾构隧道的影响分析[J].建筑科学与工程学报,2022,39(1):134-142.
- ZHANG Shasha, SU Yanhua, FAN Lin, et al. Analysis on influence of foundation pit excavation on adjacent shield tunnel[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(1): 134-142.
- [6] 徐宏增,石磊,王振平,等.深基坑开挖对邻近大直径管线影响的优化分析[J].科学技术与工程,2021,21(2):714-719.
- XU Hongzeng, SHI Lei, WANG Zhenping, et al. Optimization analysis of the influence of deep foundation pit excavation on adjacent large-diameter pipeline [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(2): 714-719.
- [7] 张超翔,张志强.深基坑桩锚支护结构位移分析及数值模拟[J].科学技术与工程,2022,22(18):8022-8029.
- ZHANG Chaoxiang, ZHANG Zhiqiang. Displacement analysis and numerical simulation of pile-anchor retaining structure in deep foundation pit[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(18): 8022-8029.
- [8] 周中,鄢海涛,李守文,等.高层建筑紧邻深大基坑开挖变形分析[J].现代隧道技术,2022,59(增1):1102-1110.
- ZHOU Zhong, YAN Haitao, LI Shouwen, et al. Deformation analysis of high-rise building adjacent to deep and large foundation pit excavation[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(S1): 1102-1110.
- [9] 胡斌,李小青,张玉.基坑降水对邻近桥下道路的影响及防治措施[J].水电能源科学,2019,37(6):99-102.
- HU Bin, LI Xiaoqing, ZHANG Yu. Influence and treatment of dewatering of foundation pit on adjacent road under the bridge[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(6): 99-102.
- [10] 刘勇,冯志,黄国超,等.北京地铁工程深基坑围护结构变形研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(2):329-335.
- LIU Yong, FENG Zhi, HUANG Guochao, et al. The study in predicting the deformation of supporting structure for deep foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(2): 329-335.
- [11] 郑刚,邓旭,刘畅,等.不同围护结构变形模式对抗外深层土体位移场影响的对比分析[J].岩土工程学报,2014,36(2):273-285.
- ZHENG Gang, DENG Xu, LIU Chang, et al. Comparative analysis of influences of different deformation modes of retaining structures on displacement field of deep soils outside excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 273-285.
- [12] 郑刚,王琦,邓旭,等.不同围护结构变形模式对抗外既有隧道变形影响的对比分析[J].岩土工程学报,2015,37(7):1181-1194.
- ZHENG Gang, WANG Qi, DENG Xu, et al. Comparative analysis of influences of different deformation modes of retaining structures on deformation of existing tunnels outside excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1181-1194.
- [13] 周鹏,李凯.城市建成区建筑基坑开挖对周边道路的影响及其时空特征研究[J].测绘通报,2021(增2):136-139,144.
- ZHOU Peng, LI Kai. On the settlement monitoring of super high-rise building in the mountainous city and relevant data analysis[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(S2): 136-139, 144.
- [14] 雷华阳,冯双喜,万勇峰,等.基坑开挖对既有临近滩涂铁路路基影响规律及安全措施研究[J].天津大学

- 学报(自然科学与工程技术版), 2019, 52(9): 969-978.
- LEI Huayang, FENG Shuangxi, WAN Yongfeng, et al. Influence law and safety measures of foundation pit excavation on existing railway subgrade in tidal flat areas[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2019, 52(9): 969-978.
- [15] 陈云钢, 张 胜, 许 立, 等. 桩锚复合支护结构对临近铁路侧基坑开挖的影响[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 90-96.
- CHEN Yungang, ZHANG Sheng, XU Li, et al. Influence of pile-anchor composite support structure on excavation of foundation pit near railway[J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2021, 38(1): 90-96.
- [16] 李向群, 杨丰年, 王海鹏. 桩锚支护结构数值模拟分析[J]. 吉林建筑大学学报, 2015, 32(1): 18-20.
- LI Xiangqun, YANG Fengnian, WANG Haipeng. Pile anchor support in technical support of deep foundation pit[J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2015, 32(1): 18-20.
- [17] 杨晓华, 赵滨京, 吴 昊, 等. 千枚岩深埋隧道支护参数对结构受力与变形的影响[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(3): 108-117.
- YANG Xiaohua, ZHAO Binjing, WU Hao, et al. Influence of supporting parameters of phyllite deep tunnel on structural stress and deformation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(3): 108-117.
- [18] 建筑基坑支护技术规程: JGJ 120—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations: JGJ 120—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [19] 杨晓华, 曹扬帆, 肖 靖, 等. 开挖方式对跨基覆界面浅埋偏压隧道变形的影响分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2023, 40(3): 111-120.
- YANG Xiaohua, CAO Yangfan, XIAO Jing, et al. Analysis of influence of excavation methods on deformation of shallow-buried bias tunnels across base and cover interface[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2023, 40(3): 111-120.
- [20] KUNG G T, JUANG C H, HSIAO E C, et al. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(6): 731-747.
- [21] SCHANZ T, VERMEER P A, BONNIER P G. The hardening soil model: formulation and verification [M]//BRINKGREVE R B J. Beyond 2000 in Computational Geotechnics. London: Routledge, 2019: 281-296.
- [22] 范 巍, 王建华, 陈锦剑. 连续墙与土体接触特性对深基坑变形分析的影响[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12): 2118-2121.
- FAN Wei, WANG Jianhua, CHEN Jinjian. The evaluation of deformation induced by excavation considering the properties of diaphragm-soil interface[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2006, 40(12): 2118-2121.
- [23] 杨清源, 赵伯明. 潜水层基坑降水引起地表沉降试验与理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(6): 1506-1519.
- YANG Qingyuan, ZHAO Boming. Experimental and theoretical study on the surface subsidence by dewatering of foundation pit in phreatic aquifer[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(6): 1506-1519.
- [24] 张向东, 刘宏彪. 桩锚支护下临近建筑基坑变形规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(6): 888-892.
- ZHANG Xiangdong, LIU Hongbiao. Near building excavation deformation of pile-anchor support[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2018, 37(6): 888-892.
- [25] 丁森林, 钱德玲, 戴启权, 等. 车辆荷载影响下深基坑开挖稳定性分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(5): 671-676.
- DING Senlin, QIAN Deling, DAI Qiquan, et al. Analysis on the stability of deep foundation pit excavation under vehicle loads[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2019, 42(5): 671-676.
- [26] 建筑基坑工程监测技术规范: GB 50497—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- Technical code for monitoring of building excavation engineering: GB 50497—2009 [S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [27] 曾宪明, 林大路, 李世民, 等. 锚固类结构杆体临界锚固长度问题综合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增 2): 3609-3625.
- ZENG Xianming, LIN Dalu, LI Shimin, et al. Comprehensive research of critical anchorage length problem of rod of anchorage structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3609-3625.