

DOI: 10.7672/sgjs2024010011

# 湿陷性黄土地区百米超长桩施工关键技术研究\*

于宗让,唐良,韩国定

(陕西建工机械施工集团有限公司,陕西西安710000)

**[摘要]** 依托陕西省铜川市玉皇阁二号桥及引线工程百米超长桩项目,比选了各类成孔方法和钻机,选定旋挖成孔法施工工艺和徐工XR800E旋挖钻机,完成该百米超长桩施工。介绍了百米超长桩的关键技术要点和质量控制措施,并从钻孔前的预处理、钻孔过程中的综合处理、钢筋笼施工控制措施等方面保证该超长桩施工的可靠性。通过试桩试验,确定了百米超长桩在湿陷性黄土场地的承载力和沉降特性。施工过程中,严格把控土层钻进参数、泥浆循环系统、沉渣厚度、钢筋笼安全稳定性验算、水下混凝土灌注等关键环节,为类似湿陷性黄土地区百米超长桩施工提供解决方案。

**[关键词]** 桩基础;湿陷性黄土;旋挖成孔法;试桩;承载力;施工技术

**[中图分类号]** TU753.3

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2024)01-0011-06

## Research on Key Construction Techniques for Extra Long Piles in Collapsible Loess Regions

YU Zongrang, TANG Liang, HAN Guoding

(SCEGC Mechanized Construction Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710000, China)

**Abstract:** Based on the 100-meter super-long pile project of Yuhuangge No. 2 Bridge and Approach Line Project in Tongchuan City, Shaanxi Province, various hole-forming methods and drilling rigs are compared and selected. The construction technology of the rotary drilling hole-forming method and the XCMG XR800E rotary drilling rig were selected to complete the construction of 100-meter super-long piles. The key technical points and quality control measures of 100-meter super-long piles were introduced, and the reliability of the super-long pile construction was guaranteed from the aspects of pretreatment before drilling, comprehensive treatment during drilling, and reinforcement cage construction control measures. The bearing capacity and settlement characteristics of the 100-meter super-long pile in the collapsible loess site were determined through the test pile. The key links, such as drilling parameters of the soil layer, mud circulation system, sediment thickness, safety and stability checking of the steel cage, and underwater concrete pouring, were strictly controlled during the construction process, which provides a solution for the construction of 100-meter super-long piles in similar collapsible loess areas.

**Keywords:** piles; collapsible loess; rotary drilling method; test pile; bearing capacity; construction

### 0 引言

湿陷性黄土是我国西北地区和内蒙古地区常见的土壤类型,在桥梁和建筑等工程建设领域中,因其不均匀性和极度变形性,常伴随着桩基沉降量

大、承载力不稳定等问题<sup>[1]</sup>。超长桩作为一种有效的解决方案,可以充分利用黄土地基较深层的坚硬岩石地层,提高桩基的承载力和稳定性<sup>[2]</sup>。

目前,超长桩的设计受到地质、水文等多种因素的制约。如何在满足结构建设需求的前提下,使超长桩在湿陷性黄土地区起到更好的作用是当前研究的重点之一。刘继鹏等<sup>[3]</sup>对豫西地区湿陷性黄土地基的施工处理和力学性能进行了系统分析,总结出适用于该地区的减小沉降量和地基加强的

\* 陕西省交通运输厅科研项目(21-63K);陕西省住房和城乡建设科技计划(2022-S21);2022年陕西省级国有资本经营预算科技创新专项资金

[作者简介] 于宗让,总经理,高级工程师, E-mail: 1489852250@qq.com

[收稿日期] 2023-05-05

施工技术,并提出了优化措施。鲁爱民<sup>[4]</sup>探讨了 CFG 桩与湿陷性黄土地基沉降量之间的关系,并提出了针对包头市地区复合地基处理实际应用的优化方案。杨勇涛等<sup>[5]</sup>介绍了钻孔灌注桩在施工中需要考虑的因素,并提出了一种针对湿陷性黄土地基的钻孔灌注桩施工工艺流程,有效控制了桩基沉降。在湿陷性黄土地区超长桩施工控制研究方面,王同民<sup>[6]</sup>针对超长桩施工过程中遇到的巨型溶洞采取三维物探方法确定参数,并通过钻机选型、预注浆等技术措施高质量地完成了施工。

总体来看,湿陷性黄土地区超长桩相关领域的研究已经取得了很大进展,学者们提出了多种适用于湿陷性黄土地区超长桩的新技术和新方法。然而,一些问题仍然需要进一步深入研究,例如如何提高超长桩的承载能力和抗侧向力能力,以及结合现场具体情况保证超长桩的施工质量等问题<sup>[7]</sup>。本文以百米超长桩施工为依托,阐明了湿陷性黄土地区百米超长桩的施工工艺和控制措施,以期对湿陷性黄土地区基础设施建设提供更好的解决方案。

## 1 工程概况

铜川市玉皇阁二号特大桥主桥下部共 28 个桥墩,桩基础为钢筋混凝土钻孔灌注桩,设计桩径 1.5,1.8,2.0,2.2m,设计桩长 42~102m,钻孔深度最深约 105m,每个桥墩设 6~45 根桩,共计 529 根,方量约 10 万 m<sup>3</sup>。桩基长度分布情况:42~60m 占 28%,60~80m 占 46.5%,80~85m 占 17%,100m 以上占 8.5%。

16 号主墩采用 45 根直径 2.0m 的钻孔灌注桩作为基础设计,有效桩长 102m,成孔深度 104.5m,是全桥最深的桩基,也是陕西省及西北地区最深的桩基之一(见图 1)。该桩基为端承桩,沉积物厚度小于 5cm。该桩位于黄土塬斜坡地带且地形起伏大,地形凌乱,沟壁陡峻给桩基施工增添困难,且桩基最端承桩入岩较深、强度较大,施工难度大。

## 2 工程地质条件

本工程路线主要地貌为黄土台塬和黄土冲沟,黄土台塬地形由北向南逐渐下降,向赵氏河谷倾斜,地质情况如图 2 所示。

## 3 湿陷性黄土桩基施工重难点

1) 二号特大桥为全线关键控制性工程,施工工期特别紧,而主墩钻孔灌注桩施工所处地质条件复杂,桩基成孔深度达 104.5m,地层以马兰黄土、离石黄土及粉质黏土为主,该层黄土具有中等湿陷性,湿陷等级为自重 II 级。该层设计桩侧土摩阻力为 -10kPa,如何有效降水是施工控制的难点。

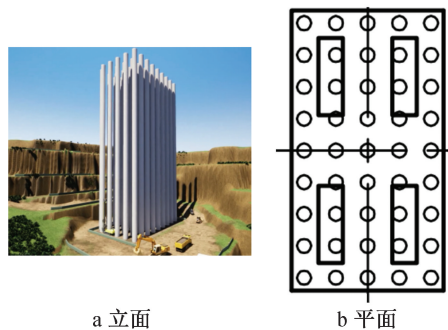


图 1 16 号主墩桩基

Fig. 1 Pile foundation of No. 16 main pier

层底深度/m	柱状图	岩土名称及特征
0(683.300)		马兰黄土和离石黄土厚度约 40m, 该层黄土具有中等湿陷性, 承载力低、工程性质差, 夹有多层古土壤, 一般为 4~8 条, 古土壤厚度为 0.5~3.5m
41(642.300)		砂岩 I: 青灰色, 节理裂隙发育, 分布深度 40~70m
71(612.300)		离石黄土夹层: 含承压水层, 厚度 11~20m
79(604.300)		粉质黏土: 黄褐色, 潮湿, 硬塑状
84(599.300)		砂岩 II: 紫红色, 强风化, 半成岩状态, 厚度一般 5~10m
94(589.300)		砂岩 III: 青灰色, 中风化, 最小埋深大于 40m, 厚度大于 200m, 该层是端承桩的持力层, 地下水埋深大, 水量丰富, 水力性质为弱承压水
104.5(578.800)		

图 2 16 号墩地层分布

Fig. 2 Geological distribution of No. 16 pier

2) 主墩桩基钻进深度大, 16 号主墩桩基有效桩长 102m, 钻孔深度达 104.5m, 累积需穿过岩层厚度 61.5m, 岩石强度大, 随着钻杆的延长, 旋挖钻机扭矩急剧下降, 工效低且极易损坏钻杆, 对于超深桩基成孔设备的选型以及专业操作人员的作业水平要求都比较高。

3) 成孔过程中容易塌孔而且由于桩长较长, 要穿越软硬不同的多个地层, 从上到下地质条件差异大, 在穿越不同地层时需要使用不同功能的成孔机械。由于穿越不同土层, 各土层对护壁泥浆的要求不一样, 需要随时调整护壁泥浆的配合比, 泥浆配合比的优化及沉渣厚度控制是施工的关键。

4) 钢筋笼直径大、长度长, 线形及对接精度不易控制, 如何优化钢筋笼制安工艺及提高安装效率至关重要。

5) 根据设计要求, 桩基采用 C35 混凝土进行浇筑, 混凝土浇筑量 323m<sup>3</sup>, 浇筑持续时间长, 对混凝

土工作性能要求高,桩基混凝土灌注是施工中风险最大的环节,如何保证混凝土成功封底及后续连续灌注,是控制重点。

6)由于桥梁桩基按端承桩进行设计,规范要求端承桩桩底沉渣厚度不大于 50mm,超深桩基清孔难度大,钢筋笼长度 103.5m,孔口拼装时间过长,软弱地层易产生塌孔或沉渣超标。

#### 4 成孔方法与钻机比选

大直径超长灌注桩成桩质量直接影响桩基承载性能的发挥。由于大直径超长灌注桩在施工中面临垂直度控制、泥浆控制、成孔质量控制、灌注困难等一系列问题<sup>[8]</sup>,直接影响大直径超长灌注桩的使用及推广。因此,成孔工艺和钻机选型对于施工尤其重要。

##### 4.1 各类成孔方法对比

我国灌注桩成孔工艺主要有:人工挖孔、沉管成孔、回转钻孔、冲击成孔、旋挖钻孔以及贝诺特成孔方法<sup>[9]</sup>。这些方法都有自身的优势和局限性,应结合工程地质条件灵活选择并需进一步创新。

为保证超长桩施工质量、加快桩基施工进度、控制桩基成本,本文从多方面对正循环成孔法、回转钻孔、冲击成孔、旋挖钻孔以及贝诺特成孔方法进行综合比选,如表 1 所示。

表 1 各类施工工艺适用范围

Table 1 Scope of application of various construction technologies

成孔工艺	适用范围			
	岩土层	孔径/m	桩长/m	泥浆作用
正循环成孔法	黏性土、砂类土、含少量砾石、卵石(含量少于 20%)的土、软石	0.6~3.0	<80	悬浮沉渣和护壁
回转钻孔	碎石、粉土、粒径小于 10mm 的砂砾层	0.6~3.0	<80	悬浮沉渣和护壁
冲击成孔	各类土层及风化岩石层	0.6~3.0	<120	悬浮沉渣和护壁
旋挖成孔	粉土、砾砂、黏土、碎石	0.6~3.0	<120	护壁
贝诺特	各类土层、岩层	0.6~3.0	<120	无泥浆

不难发现,在工程应用中,当桩长较深、桩径较大、地质条件较为复杂的情况下,采用旋挖成孔法进行施工能最大限度发挥其优势,其工效比也将最大化,非常适合湿陷性黄土地区百米超长超大直径桩施工<sup>[10]</sup>。

##### 4.2 钻机选型与参数选择

###### 4.2.1 钻机选型

针对各桩基的施工,拟定了 3 种方案并实施,根据施工实践对比(见表 2),最终选择水孔大旋

挖钻机施工。

表 2 施工方案比选

Table 2 Comparison and selection of construction schemes

方案	机械选型
前期方案:干孔	旋挖钻 1 台山河智能 450 型和 1 台三一 360 钻机
中期改进方案:水孔(反循环)	旋挖钻 1 台山河智能 450 型和 1 台三一 360 钻机
最终方案:水孔	大旋挖钻机,1 台徐工 XR550 钻机,1 台徐工 XR800E 钻机

##### 4.2.2 钻机参数选择

###### 1) 钻孔深度与扭矩

16 号主墩桩基有效桩长 102m,钻孔深度达 104.5m,所以钻机的最大钻孔深度必须大于 105m。根据 16 号墩所处地层条件,同时考虑超长桩钻孔垂直度须按 75%有效钻压减压钻进<sup>[11]</sup>,施工时钻孔机具最大扭矩不宜小于 400kN·m。

经过施工实践,对于最深的 16 号墩桩基最终选择 1 台徐工 XR550 钻机和徐工 XR800E 旋挖钻机施工。

###### 2) 钻杆

XR800E 型旋挖钻机,所选钻杆为伸缩式结构,除了扭矩参数以外影响钻孔深度的最大因素就是钻杆。目前旋挖钻机常见的钻杆有摩阻式钻杆和机锁式钻杆。结合现场地质条件和钻孔深度,向厂家定制长度为 24.5m 的机锁式钻杆用于解决钻孔深度问题,定制钻杆钻孔深度可达 110m。

###### 3) 钻头

由于钻孔深度达 104.5m,需穿越岩层累计厚度 61.5m,面对岩层埋深大、钻杆过长导致扭力衰减、钻压不足、岩石强度大、工效低、钻杆多次损坏的不利局面,积极改变施工方法,采用不同直径筒钻套打,先 1.2m,再 1.5m,最后 2.0m,由小到大逐渐加深,由于岩石裂隙发育,配合锥形钻头进行捞渣,3 天时间可成桩。

#### 5 关键技术与控制要点

##### 5.1 试桩荷载试验

为探究所用百米超长桩在湿陷性黄土场地的承载力和沉降量特性,施工开始前,选取 4 根试桩进行天然状态下的静载荷试验。

试验采用堆载法实现,堆载系统包括配重、钢梁、分配梁、钢柱等,单桩上放置千斤顶通过钢柱与分配梁接触,其中混凝土块重达 3t,试验选用的 30 个混凝土块和 3 根钢梁能提供的反力约为 108t,如图 3 所示。



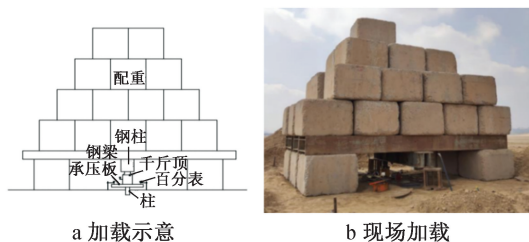


图 3 试桩荷载试验示意

Fig. 3 Test pile load test

## 5.2 钻孔过程控制

### 5.2.1 各土层钻进参数选择

在实际工程中,钻进过程会产生较大的冲击压力和振动,容易造成设备损坏、钻孔质量差等问题。因此,成孔前需要针对地层情况和工程要求进行分析,从而确定最佳的钻进参数和方案<sup>[12]</sup>,不同地质层的钻进参数取值如表 3 所示。

表 3 不同地质层钻进参数

Table 3 Drilling parameters of different geological layers

序号	地层	参数	效果
1	护筒内	钻数 6 钻以下,速率 0.8~1.2m/h	清除黏附于护筒上的黏土
2	淤泥质黏土	低档慢速、大泵量、稠泥浆	避免发生先扩孔后缩孔现象
3	黏土	中等钻速、大流量、恒泥浆	避免糊钻
4	粉砂	轻压、慢速、大流量、稠泥浆	避免孔壁不稳定,局部扩孔或塌孔
5	细砂、砾石	低档、快速、优质泥浆	利于护壁和悬浮钻渣
6	基岩	刚进入基岩面采用轻压、慢速钻进	防止因基岩界面存在不同程度的坡度而造成钻孔桩倾斜

### 5.2.2 钻进中的泥浆循环系统

针对本工程湿陷性黄土大直径深孔桩基造浆能力不足的问题,泥浆控制是钻进过程中的关键环节。玉皇阁二号特大桥采用原土+膨润土造浆工艺。首先,在钻进过程中,需要根据钻进深度、钻孔直径和不同地层条件等因素,合理选择泥浆成分,完成钻进作业。其次,需要通过调整液面高度和适时调整泥浆密度等方式来控制其性能,以在钻进过程中保护孔壁。此外,考虑到湿陷性黄土地质条件的复杂性,需要掌握合理的清孔泥浆指标,以避免风险和损失。放置钢筋笼时间过长的情况下,泥浆会变得稠密,难以清除,对钢筋笼的质量和钻孔效果产生影响。因此,清孔泥浆指标的控制至关重要,采用的清孔泥浆参数如表 4 所示。

表 4 清孔泥浆参数

Table 4 Parameters of hole cleaning mud

工序	相对密度	黏度/s	含砂率/%	胶体率/%	pH
一清	1.15~1.20	20~22	<1	≥98	8~9
二清	1.13~1.15	18~20	<1	≥98	8~9

### 5.2.3 沉渣厚度检测

由于端承桩沉渣厚度 $\leq 5\text{cm}$ ,施工时更换平底钻头对孔底进行多次捞渣,加强降水监测,缩短钢筋笼对接和导管安装时间,浇筑前采用 MC-8342 型沉渣测定仪检测沉渣厚度,符合要求后立即进行混凝土灌注。

### 5.2.4 水下混凝土灌注控制要点

1) 导管安装要求 导管下口距离孔底 30~40cm,上口与储料斗相连,确保首批混凝土灌注后导管埋入深度大于 1m,考虑扩孔等状况,要有一定的保险系数,漏斗底口应比水面或桩顶至少高出 4~6m。

2) 导管安装后,再次探测孔底沉渣厚度,如超过设计要求,则需进行二次清孔至合格为止,可利用导管进行二次清孔,也可用喷射法向孔底喷射 3~5min,使沉淀悬浮。

3) 灌注要求 水下混凝土灌注应紧凑、连续,中途不能中断,并尽量缩短拆除导管的时间。当导管内混凝土不满、含有空气时,可徐徐灌注,以防产生高压气囊压漏导管。

## 5.3 超长钢筋笼理论计算与施工措施

玉皇阁二号桥主墩钢筋笼长度大,导致施工时质量大且施工时间长。以 16 号墩为例,钢筋笼最长 103.5m,重达 21t,钢筋加工场分节加工长度 12m,钢筋笼采用预拼接 36m。对于重 21t、长 12m 的节段钢筋笼如何保证吊点不会出现应力集中形成较大变形成为施工中的一大难题。

### 5.3.1 钢筋笼理论计算

在钢筋笼安装过程中,涉及吊环制作,其中吊筋选择特别重要,需通过受力计算选择合适的吊筋,需为圆钢,一般考虑 6 倍安全系数,以防发生意外。

为减少钢筋笼的变形,采用 Midas 建模分析钢筋笼自重及吊装工况下变形情况,根据计算结果设计合理的内支撑材料、直径及布置形式,如图 4 所示。

### 5.3.2 钢筋笼施工安全控制措施

#### 1) 骨架筋加固

钢筋笼内的加强筋为  $\phi 25$  HRB400E 热轧带肋钢筋,布置间距 $< 2000\text{mm}$ ,如图 5 所示。

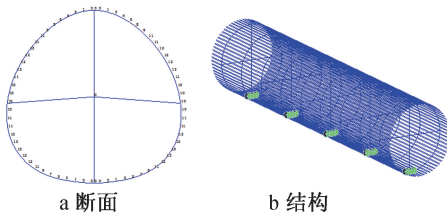


图4 钢筋笼有限元建模

Fig. 4 Finite element modeling of reinforcing cage

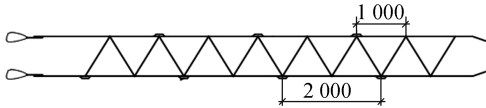


图5 加强筋示意

Fig. 5 Reinforcing ribs

## 2) 吊点加强

对称布设4个吊点,在吊点位置处,加强箍筋上方增加1根长度5cm的 $\phi 25$ 热轧带肋钢筋与 $\phi 28$ 热轧带肋钢筋,采用单面焊接,然后增加1根长度20cm的 $\phi 25$ 热轧光圆钢筋做成弯曲状与主筋单面焊接牢固,U形环严禁吊于吊环上。最顶端一节钢筋笼吊环采用4根 $\phi 25$ 热轧光圆钢筋,单面焊接于主筋上,作为吊点加强。钢筋笼吊点处的穿绳,首先利用U形环对钢丝绳进行套取,然后将U形环与钢筋笼加强筋主筋以及套环进行连接,如图6所示。

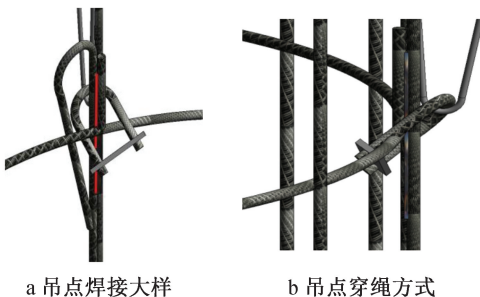


图6 钢筋笼吊点加强设计

Fig. 6 Design of reinforcing cage lifting point reinforcement

## 3) 加设顶筋

钢筋笼加劲箍与主筋连接全部接触点均采用单面点焊。在钢筋骨架施工过程中,要根据设计要求先摆放支架,使其能够承受试验荷载和加载应力。然后将已经预先配好的主筋套入加劲箍内,在焊接过程中,对主筋和加劲箍进行点焊固定,确保钢筋骨架成型。本工程钢筋笼最长为103.5m,在第2~4节设加强短筋,对称布置4个,第5~6节加强短筋布置6个,第7~9节加强短筋布置8个。加强短筋需与加劲箍接触面焊接、加强短筋与主筋焊

接、吊环与主筋焊接,确保力传递有效。

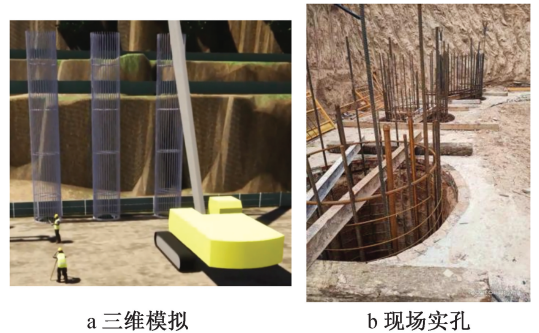
## 4) 采用定位器进行主筋定位

本桩基工程钢筋笼最小直径为1.8m,只能采用地滚进行加工。为保证主筋定位准确现场自制主筋定位器。

## 5.3.3 钢筋笼施工时间控制措施

由于桩身过长,钢筋笼吊装质量大,拼装时间长。以16号墩为例,钢筋笼重达21t,钢筋笼最长103.5m,钢筋加工场分节加工长度12m,现场对接8个截面,每个截面直螺纹套筒连接42根,声测管安装4根,每个截面对接需要2.5h,完成1个桩基钢筋笼安装共需22~24h。

施工时,在承台外侧就近布设3个预拼装孔(见图7),孔径与设计孔径一致,钻孔过程中提前将钢筋笼预拼成3段备用,将8个对接截面缩短到2个,拼装时间由22h缩短到5h。加快了桩基施工进度,降低了施工风险。



a 三维模拟

b 现场实孔

图7 钢筋笼预拼装孔

Fig. 7 Pre-assembled holes of reinforcing cage

## 6 结语

本文以湿陷性黄土地区百米超长桩的施工为例,概述了超长桩施工过程各类技术要点。在技术、质量、安全、成本、工期等维度对比分析了各类成孔工艺和钻机特点,选择旋挖成孔法工艺并选择徐工XR550和XR800E旋挖钻机进行施工。在现场施工重难点梳理的基础上,针对钻孔前的试桩试验、钻孔过程中的综合处理、钢筋笼施工控制措施等关键技术严格把关,保证工程质量。

目前该桥梁所有超长桩均顺利完成,各项验收指标和外观质量良好,成本及进度可控。自检和第三方检测结果均证明了采取的超长桩施工技术可为湿陷性黄土地区桩基施工提供优质的解决方案。

## 参考文献:

- [1] 杨晓华,张建伟,张莎莎,等. 黄土地区高速公路路地基处理技术研究进展[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2022, 42(1): 16-32.

- progress of expressway foundation treatment technology in loess area [J]. Journal of Chang'an University (natural science edition), 2022,42(1): 16-32.
- [ 2 ] 张延杰, 王旭, 梁庆国, 等. 浸水条件下湿陷性黄土地基群桩基础承载特性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021,43(S1): 219-223.  
ZHANG Y J, WANG X, LIANG Q G, et al. Model test study on bearing characteristics of collapsible loess foundation pile groups under soaking conditions [J]. Journal of geotechnical engineering, 2021,43(S1): 219-223.
- [ 3 ] 刘继鹏, 闫芳, 高一帆. 豫西山地强夯法处理湿陷性黄土地基施工技术[J]. 施工技术, 2017,46(18): 103-106.  
LIU J P, YAN F, GAO Y F. Construction technology of treating collapsible loess foundation by dynamic compaction in mountainous areas of western Henan [J]. Construction technology, 2017,46(18): 103-106.
- [ 4 ] 鲁爱民. 强夯法+CFG桩在湿陷性黄土地区地基处理中的应用[J]. 施工技术, 2017,46(15): 104-107.  
LU A M. Application of dynamic compaction and +CFG pile in foundation treatment in collapsible loess area [J]. Construction technology, 2017,46(15): 104-107.
- [ 5 ] 杨勇涛, 余承华, 祝捷. 钻孔灌注桩基础在湿陷性黄土地区的应用研究[J]. 施工技术, 2008,37(S2): 164-167.  
YANG Y T, YU C H, ZHU J. Study on application of bored pile foundation in collapsible loess area [J]. Construction technology, 2008,37(S2): 164-167.
- [ 6 ] 王同民. 鲇鱼洲长江大桥北汊航道桥 N15 号墩超长桩施工技术[J]. 桥梁建设, 2021,51(6): 118-125.  
WANG T M. Construction technology of super-long piles for pier N15 of north branch channel bridge of Miyuzhou Yangtze River Bridge [J]. Bridge construction, 2021,51(6): 118-125.
- [ 7 ] 王卫东, 徐中华, 吴江斌, 等. 基坑与桩基工程技术新进展 [J]. 江苏建筑, 2021(3): 1-10.  
WANG W D, XU Z H, WU J B, et al. New progress in foundation pit and pile foundation engineering technology [J]. Jiangsu architecture, 2021(3): 1-10.
- [ 8 ] 杨浩. 旋挖成孔灌注桩的设计、施工及应用研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.  
YANG H. Research on design, construction and application of rotary bored pile [D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.
- [ 9 ] 郭鑫. 填海区大直径超长灌注桩承载性能及施工技术研究 [D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2021.  
GUO X. Study on bearing capacity and construction technology of large-diameter and super-long cast-in-place pile in reclamation area [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2021.
- [ 10 ] 胡志平, 温馨, 张勋, 等. 湿陷性黄土地区海绵城市建设研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2021,43(2): 376-388.  
HU Z P, WEN X, ZHANG X, et al. Research progress of sponge city construction in collapsible loess area [J]. Journal of earth science and environment, 2021,43(2): 376-388.
- [ 11 ] 鲍庆伟, 高杰, 张书良, 等. 复杂岩溶地区超大径超长桩旋挖钻入岩施工技术[J]. 世界桥梁, 2017,45(4): 41-45.  
BAO Q W, ALEX G, ZHANG S L, et al. Construction technology of super-large diameter and super-long pile rotary drilling into rock in complex karst area [J]. World bridge, 2017,45(4): 41-45.
- [ 12 ] 毛奎, 王昌喜. 嘉鱼长江公路大桥超长桩旋挖钻配合冲击钻复合成孔技术[J]. 中外公路, 2018,38(3): 199-204.  
MAO K, WANG C X. Composite hole-forming technology of super-long pile of Jiayu Yangtze River Highway Bridge with rotary drilling and percussion drilling [J]. Journal of China and foreign highway, 2018,38(3): 199-204.