

文章编号:1671-8879(2017)02-0035-10

黄土洞穴对桥梁桩基竖向承载特性 影响的离心模型试验

冯忠居¹,王富春¹,苏航州^{1,2},韩秋石³,席称心^{1,4},

李 炎⁵,尹洪桦¹,建鑫龙^{1,6},梁 倩^{1,7}

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 中国电建西北勘测设计研究院有限公司,陕西 西安 710065;
3. 中国建筑第七工程局有限公司技术中心,河南 郑州 450004; 4. 广东省南粤交通投资建设有限公司,
广东 广州 510507; 5. 广东省交通规划设计研究院股份有限公司,广东 广州 510507; 6. 广东大潮高速
公路有限公司,广东 广州 510507; 7. 湖北省交通投资集团有限公司,湖北 武汉 430074)

摘 要:为给黄土地下洞穴区域的桥梁桩基在设计计算方法和施工技术等方面研究提供依据,针对实际桥梁桩基遇到黄土地下洞穴时,往往盲目地对洞穴先处理再施工,既无法保证桩基安全,也不够经济合理等问题,基于铝管模拟桩体、可发性聚乙烯(expandable polyslyrene,EPE)塑料泡沫模拟黄土地下洞穴的离心模型试验,开展了黄土地下洞穴对桥梁桩基竖向承载特性的影响研究,分析了竖向荷载作用下桩与洞穴水平间距、洞穴发育深度及桩底与洞穴垂直间距等因素对桥梁桩基竖向承载力、桩身轴力和桩侧摩阻力的影响。研究结果表明:洞穴发育深度小于 20 m 且桩与洞穴水平间距大于 1.0 倍桩径,桩与洞穴水平间距大于桩径的 20%且洞穴发育深度小于 5 m,洞穴距桩底超过 8 m 时,桩基竖向极限承载力受洞穴的影响均较小;随着桩与洞穴水平间距的增大,桩基竖向极限承载力逐渐提高,水平间距越小,桩侧摩阻力越小,桩身轴力有所增大;随着桩底与洞穴垂直间距的逐渐增大,桩基竖向极限承载力逐渐增大,垂直间距越小,桩侧摩阻力发挥越完全,桩身轴力衰减越快;相同荷载作用下,桩与洞穴水平间距越小,洞穴发育深度越深,桩侧摩阻力越小;桩顶荷载较小时,桩底与洞穴垂直间距越小,桩侧摩阻力越大。研究成果可为黄土地下洞穴区域桥梁桩基设计提供技术依据。

关键词:桥梁工程;黄土洞穴;桥梁桩基础;竖向承载特性;离心模型试验

中图分类号:U443.15

文献标志码:A

Centrifuge model test on effect of underground loess cave on vertical bearing characteristic of bridge pile foundation

FENG Zhong-ju¹, WANG Fu-chun¹, SU Hang-zhou^{1,2}, HAN Qiu-shi³, XI Chen-xin^{1,4}
LI Yan⁵, YIN Hong-hua¹, JIAN Xin-long^{1,6}, LIANG Qian^{1,7}

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Power China Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 3. Technical Center of China Construction Seventh Engineering Division Co. Ltd., Zhengzhou 450004, Henan, China; 4. Guangdong Nanyue Transportation Investment & Construction Co. Ltd., Guangzhou 510507, Guangdong, China;

收稿日期:2016-10-21

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2013JM7016)

作者简介:冯忠居(1965-),男,山西万荣人,教授,博士研究生导师,E-mail:ysf@gl.chd.edu.cn。

5. Guangdong Province Communications Planning & Design Institute Co. Ltd., Guangzhou 510507, Guangdong, China; 6. Guangdong Dachao Expressway Co. Ltd., Guangzhou 510507, Guangdong, China; 7. Hubei Provincial Communications Investment Group Co. Ltd., Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: Due to the lack of enough reference on design calculation method and construction technology of bridge pile foundation in loess region with underground caves, loess caves are blindly treated before construction on the condition of bridge pile foundation with loess underground caves, which can not guarantee the security of pile and is also uneconomical. According to the centrifugal model test with Aluminum tube simulating pile and expandable polystyrene (EPE) plastic foam simulating loess cave, the influence of loess underground caves on vertical bearing characteristic of bridge pile foundation was studied. Under the action of vertical load, the effect of some factors on vertical bearing capacity of bridge pile foundation, axial force of pile shaft and pile side friction resistance were analyzed. These factors include the horizontal spacing between pile and cave, the depth of cave development and the vertical spacing between pile bottom and cave. The results show that when the depth of cave development is less than 20 m and the horizontal spacing between pile and cave is larger than 1.0 times of the pile diameter, or the horizontal spacing of pile and cave is larger than 20% of pile diameter and the depth of cave development is less than 5 m, or the vertical spacing between pile bottom and cave exceeds 8 m, the vertical ultimate bearing capacity is less affected by the cave. With the increase of horizontal spacing between pile and cave, the vertical ultimate bearing capacity of pile foundation is gradually increased. The smaller the horizontal spacing, the smaller the pile side friction resistance and the larger the axial force of pile shaft. With the gradual increase of vertical spacing between pile bottom and cave, the vertical ultimate bearing capacity of pile foundation also increases. The smaller the vertical spacing, the bigger the pile side friction resistance, and the smaller the axial force of pile shaft. Under the same load, the smaller the horizontal spacing between pile and cave, the deeper the depth of cave development and the smaller the pile side friction resistance. The smaller the load of pile top, the smaller the vertical spacing between pile bottom and cave and the bigger the pile side friction resistance. The results can provide design technical basis for bridge pile foundation in loess region with underground caves. 2 tabs, 18 figs, 26 refs.

Key words: bridge engineering; loess cave; bridge pile foundation; vertical bearing characteristics; centrifuge model test

0 引言

中国中西部地区分布着大面积黄土,分布面积达 $4.3 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。湿陷性黄土在自身重力及水流冲蚀作用下易发育成地下洞穴,黄土的垂直节理特征也易形成地下空洞。在小于 1 m 的表层土中,主要分布有直径小于 10 cm 的微型洞穴及直径为 10~50 cm 的小型洞穴;在 1~3 m 的浅层土中,多为直径 50~150 cm 的中型洞穴;在黄土发育深度为 3~10 m 的范围中,多为直径 150~400 cm 的大型洞穴;在黄土发育深度为 10~20 m 的范围中,洞穴直径甚至可以达到 400 cm 以上;在黄土发育深度大于 20 m 的地区,洞穴断面大小及形态不稳定,内部常有巨大的空间。在黄土洞穴的强发育区,洞穴发育密度可超过 200 个/ km^2 。洞穴造成了土体缺失,在土中留有空洞,使土体变的疏松。洞穴直径越大或

洞穴分布密度越大,其土体疏松程度越高,土体强度降低也越明显^[1-12]。

中国西部地区已建或在建的许多公路、铁路穿越黄土地区时,其桥梁下部结构多采用桩基础。高速公路桥梁穿越黄土地下洞穴发育的区域,洞穴对桥梁桩基础的承载能力及其施工技术都有不同程度的影响。目前国内外在黄土地下洞穴对桩基承载特性影响方面的研究鲜有报道。针对黄土地区桩基承载特性的研究主要集中在黄土湿陷性对桥梁桩基承载特性的影响和黄土洞穴对路基路面的影响等方面^[13-22]。由于黄土地下洞穴区域的桥梁桩基在设计计算和施工中缺乏足够的技术参考依据,故实际工程中往往盲目地对地下洞穴先处理,再施工。但公路在空间上多为线性分布,分布地域广,分散性大,若盲目地对黄土地下洞穴进行工程处理,显然不够经济合理;且在不能明确洞穴分布对桩基承载力

影响程度的情况下,即使对洞穴进行了处理,桩基安全性也无法保证。因此,为探明黄土地下洞穴对桥梁桩基竖向承载特性的影响,本文通过开展比例尺为 1 : 100,加速度为 100g(g 为重力加速度)的离心模型试验,研究桩与洞穴水平间距、洞穴发育深度和桩底与洞穴垂直间距对桩基竖向承载特性的影响,为黄土地下洞穴区域桥梁桩基的设计计算和施工提供技术参考。

1 模型试验方法

1.1 模型试验的相似率

采用与原型相同的土来制备模型,因土的弹性模量和剪切模量主要受土体的应力水平控制,将 1 : n 缩尺的模型置于 ng 的加速度空间中(n 为缩尺比),便可再现原型中土体的应力水平,因此,当离心机为模型提供 ng 的加速度时,模型试验即可满足要求。关于离心试验的研究大都是按应力相似原理进行的。根据离心力与重力等效的原理,将缩尺模型放在离心加速度场中,实现模型与其原型在应力、应变各方面等效。桩基离心模型试验物理比尺关系见表 1。

表 1 桩基离心模型试验中的比尺关系

Tab. 1 Relationships between scale and size of pile foundation for centrifuge model test		
物理量	量纲	比例因数
模型尺寸 l	L	1 : n
沉降 S	L ³	1 : n
密度 ρ	ML ⁻³	1
离心力加速度 a	LT ⁻²	n
承载力、荷载、轴力 F	MLT ⁻²	1 : n^2
重度 γ	ML ⁻² T ⁻²	n
位移 u	L	1 : n
应变 ϵ		1
内摩擦角 φ		1
黏聚力 c	ML ⁻¹ T ⁻²	1
弹性模量 E	ML ⁻¹ T ⁻²	1

1.2 模型桩制作

试验桩采用外径为 25 mm、壁厚为 2 mm 的铝管模拟钢筋混凝土桩体,桩长为 35 cm,其中 30 cm 埋入土中。铝管的弹性模量为 6.34×10^{10} Pa,换算成实心、等直径截面的钢筋混凝土桩体的弹性模量为 1.87×10^{10} Pa。铝管内壁贴有应变片,模型试验采用 BE120-3AA 应变片(灵敏系数为 2.0~2.2,电阻值为 120 Ω)。为了保证应变片在铝管埋入土层后具有较高的存活率,试验中将管材沿纵向剖开,在

其内壁两侧按一定间距对称布设 6 对应变片,然后在桩身剖开截面上涂环氧树脂,将试验桩粘贴在一起。同时,由于有 5 cm 桩身没有埋入土中,故在桩顶位置焊接了一段钢管,用于箍紧试验桩。应变片采用半桥接法,每个测试用应变片对应 1 个补偿应变片,应变片通过 7 芯航空插头与离心机建立连接并实现信号传输。桩顶焊接有加载平台,采用质量为 225 g 的铁片,铁片尺寸为 12 cm \times 12 cm。桩身应变测点布置如图 1 所示。

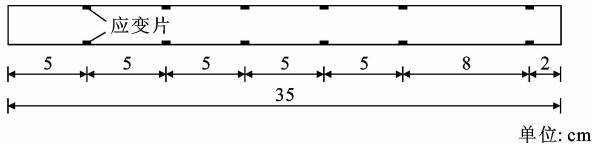


图 1 应变片布设

Fig. 1 Setting of strain gauge

1.3 地基土制备与填筑

试验用土为黄土,土样按最佳含水率配制,通过室内击实试验确定的土样最佳含水率为 13.50%。地基土弹性模量为 20 MPa,采取 5 cm 为 1 层,分层压实的方法填筑。填筑地基土时,对分层处土层表面进行刮毛处理,以消除地基土的分层现象。

1.4 模型箱、荷载加载及位移测量装置

为尽量减小边界效应对模型试验结果的影响,试验选定 TLJ-3 型土工离心机配套的大模型箱作为试验箱,模型箱净尺寸为 70 cm(长) \times 36 cm(宽) \times 50 cm(高)。由于试验桩外径为 2.5 cm,6 倍桩径外的土层对桩基承载力影响已经很小^[23],故在模型箱中可同时进行 2 根桩的试验,两桩间距 35 cm,各桩距模型箱边界 15 cm,满足边界条件要求。加载和位移测量装置为自行设计制作的钢制反力架,如下页图 2 所示。竖向荷载共 8 级,每级 225 N,加载范围为 225~1 800 N,加载时每级荷载维持 10 min。桩顶竖向位移测量采用 WDL-25 直滑式导电塑料位移计,最大量程为 25 mm,独立线性度为 0.2%,精度满足要求。每个桩顶对称于试验桩中心处安装 2 个位移计,用于消除桩身发生斜向下位移时的测量误差。

1.5 黄土地下洞穴的模拟

黄土地下洞穴采用可发性聚乙烯(EPE)塑料泡沫来模拟,将尺寸为 1 cm \times 1 cm \times 1 cm 的 EPE 塑料泡沫埋于弹性模量为 20 MPa 的黄土中时,泡沫的变形可忽略,如下页图 3 所示。考虑到试验在 100g 离心加速度下进行,土体中应力的增大可能导致 EPE 塑料泡沫进一步被压缩,故进行了 2 组试验

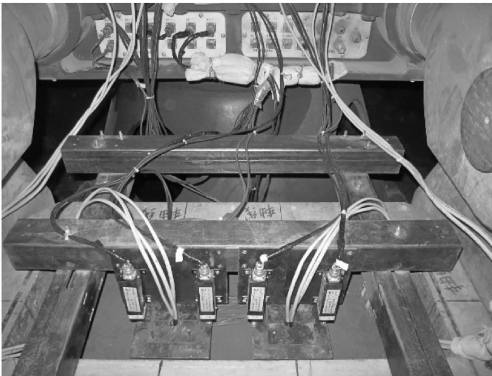
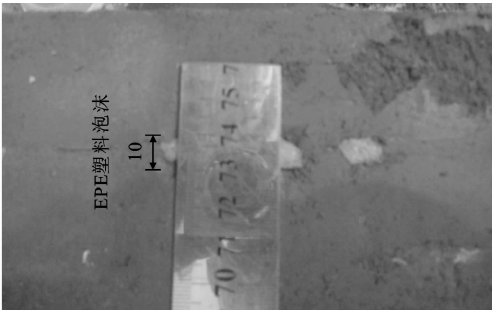


图2 加载和位移测量装置

Fig.2 Loading equipment and displacement measuring system



单位: mm

图3 EPE 塑料泡沫变形情况

Fig.3 Deformation of EPE plastic foam

来确定埋有 EPE 塑料泡沫的黄土与无 EPE 塑料泡沫的黄土在 100g 离心加速度下运行 1 个工况(所需时间约 210 min)后的变形情况。在距模型箱底部 20、25、30、35 cm 共 4 层的土层中满层布设,泡沫间距为 4 cm,黄土厚度为 40 cm。离心机运行后的土体变形情况如图 4 所示,从图中可以看到模型箱侧壁处黄土的变形痕迹。由测量结果可知,有 EPE 塑料泡沫和无 EPE 塑料泡沫的黄土最大变形均约为4 mm,相差很小,因此可知 100g 的加速度水平对 EPE 塑料泡沫的变形影响很小。综上所述,采用 EPE 塑料泡沫模拟黄土地下洞穴是合理的。试验中的黄土地下洞穴布设如图 5 所示。

1.6 试验工况

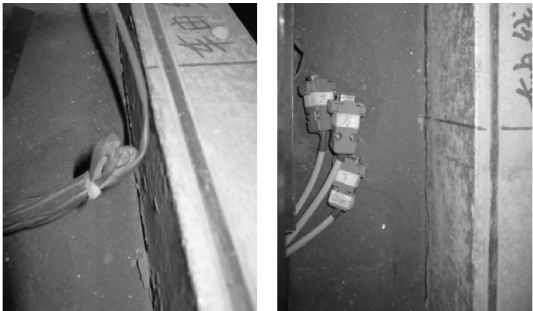
根据黄土地下洞穴的分布特征,在不大于 20 m 的黄土地层中,普遍可见直径为 50~150 cm 的中型暗穴。因此,试验将桩身周围的暗穴尺寸定为1 cm×1 cm×1 cm(对应的暗穴实际尺寸为1 m×1 m×

表 2 黄土地下洞穴布设工况

Tab.2 Setting conditions of loess underground caves

分析因素	洞穴模型尺寸			桩与洞穴水平间距	洞穴发育深度	桩底与洞穴垂直间距
	长	宽	高			
桩与洞穴水平间距	1	1	1	0.1D、0.2D、0.5D、1.0D	20	
洞穴发育深度	1	1	1	0.2D	5、10、15、20、30	
桩底与洞穴垂直间距	5	5	2			2、3、5、8

注:D 为桩基直径。



(a) 埋有EPE塑料泡沫 (b) 无EPE塑料泡沫

图4 有 EPE 塑料泡沫和无 EPE 塑料泡沫的黄土变形
Fig.4 Deformation of loess with EPE plastic foam and without EPE plastic foam

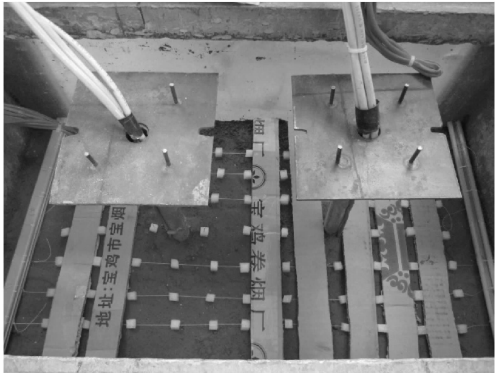


图5 黄土地下洞穴模型的布设

Fig.5 Arrangement of loess underground cave model

1 m),用以模拟中型暗穴;大于 20 m 的深层土中,暗穴多以巨大的中空空间形式出现。因此,桩底暗穴尺寸定为 5 cm×5 cm×2 cm(对应的暗穴实际尺寸为 5 m×5 m×2 m),用以模拟巨型暗穴。由于强发育区洞穴分布密度可超过 200 个/km²,故试验中洞穴均满层布设,洞穴间距为 4 cm。通过改变距桩侧最近洞穴的位置实现桩与洞穴水平间距的变化,桩底洞穴共布设 5 个,桩侧洞穴与桩底洞穴的布设如下页图 6 所示,洞穴布设工况见表 2。

2 桩与洞穴水平间距变化对桩基竖向承载特性的影响

2.1 极限承载力变化规律

桩与洞穴水平间距变化时桩基的荷载-位移曲线如下页图7所示。由于荷载-位移曲线为缓变型,

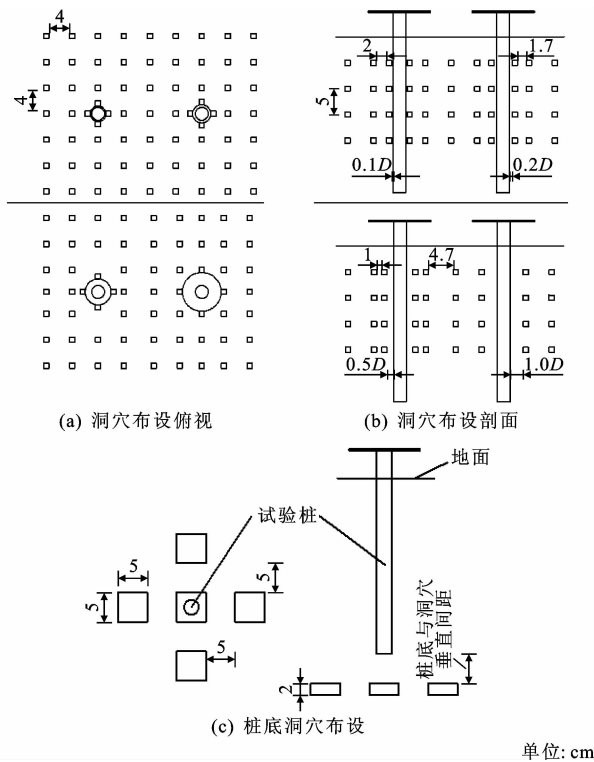


图 6 洞穴布置情况
Fig. 6 Arrangement of caves

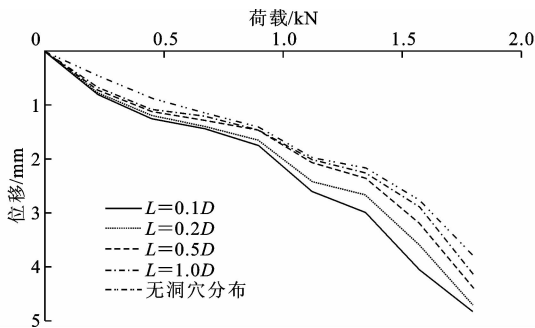


图 7 桩与洞穴水平间距 L 变化时的桩基荷载-位移曲线
Fig. 7 Load-displacement curves of pile with change of horizontal spacing between pile and loess cave

无明显拐点,故取桩顶位移为 $0.06D(1.5\text{ mm})$ 对应的荷载作为桩基竖向极限承载力^[24]。

桩与洞穴水平间距 L 变化时的桩基竖向极限承载力变化如图 8 所示。从图 8 可以看出,桩与洞穴水平间距分别为 $1.0D$ 、 $0.5D$ 、 $0.2D$ 、 $0.1D$ 时,桩基竖向极限承载力分别为 844.4 、 818.7 、 798.1 、 785.6 N ,比桩周无洞穴分布时(桩基竖向极限承载力为 894.3 N)分别降低了 5.6% 、 8.5% 、 10.8% 和 12.2% ,说明桩周洞穴削弱了桩基竖向极限承载力,且随着桩与洞穴水平间距的减小,削弱作用逐渐增强。当桩与洞穴水平间距大于 $1.0D$ 时,桩基竖向极限承载力受地下洞穴的影响已经很小(小于

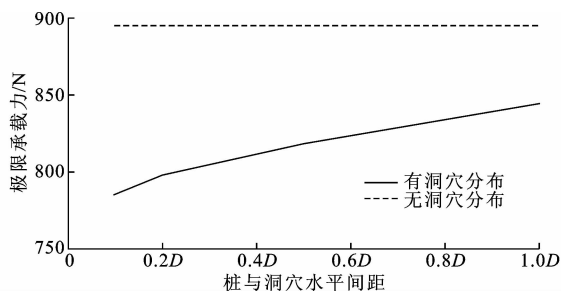


图 8 桩与洞穴水平间距变化时的桩基竖向极限承载力
Fig. 8 Vertical ultimate bearing capacity of pile with change of horizontal spacing between pile and loess cave

5.6%)。因此,根据本试验结果可知,当桩与洞穴水平间距大于 $1.0D$ 时,即使不对地下洞穴进行处理,桩基竖向极限承载力仍可以达到无洞穴分布情况时的 94.4% 。

2.2 桩身轴力及桩侧摩阻力变化规律

试验结果表明,桩周洞穴的存在削弱了桩侧摩阻力,桩与洞穴的水平间距越小,桩侧摩阻力越小,桩顶荷载向下传递,使轴力有所增大。由于桩顶荷载不同时,桩与洞穴水平间距变化下的桩身轴力和桩侧摩阻力的变化规律均基本相同,故仅将桩顶荷载为 450 N 下的桩身轴力和桩侧摩阻力分布示出,如图 9、下页图 10 所示。由于桩周洞穴主要影响的是桩侧摩阻力的发挥,因此桩周洞穴对摩擦桩的承载能力影响较大,而对于端承桩来说,其承载力主要由桩端持力层提供,桩侧摩阻力所占比重较小,桩周洞穴对端承桩承载能力的影响也较小。

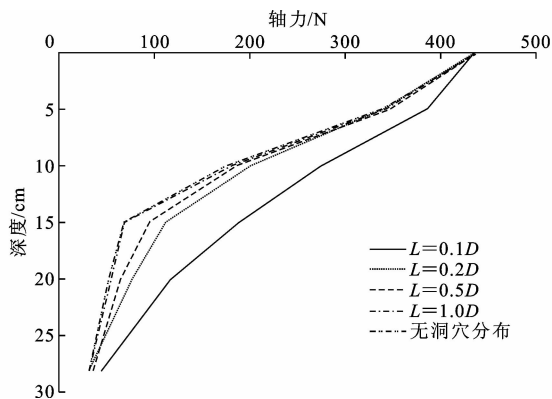


图 9 桩身轴力随桩与洞穴水平间距变化的分布
Fig. 9 Distributions of axial force of pile with change of horizontal spacing between pile and loess cave

3 洞穴发育深度变化对桩基竖向承载特性的影响

3.1 极限承载力变化规律

下页图 11 所示为洞穴发育深度 H 变化时的桩

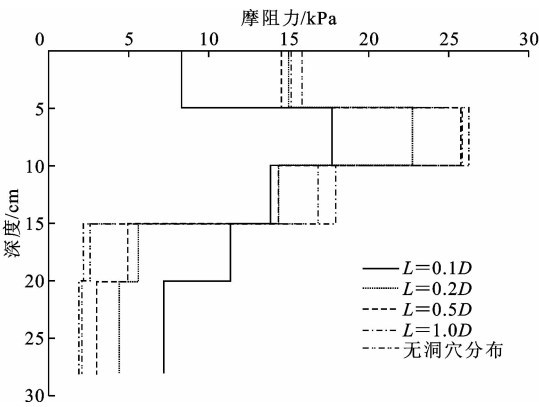


图 10 桩侧摩阻力随桩与洞穴水平间距变化的分布
Fig. 10 Distributions of pile friction with change of horizontal space between pile and loess cave

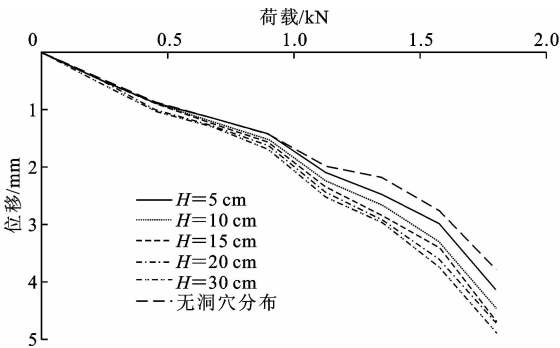


图 11 洞穴发育深度 H 变化时的桩基荷载-位移曲线
Fig. 11 Load-displacement curves of pile with change of developing depth of loess cave

基荷载-位移曲线。图 12 为洞穴发育深度变化时桩基竖向极限承载力的变化。

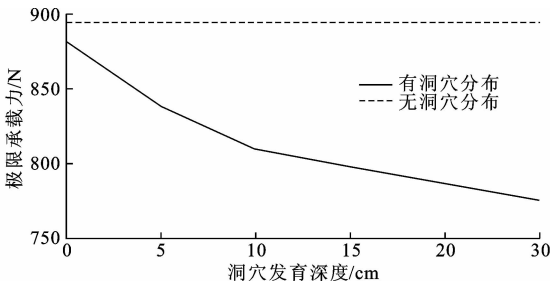


图 12 洞穴发育深度变化时桩基竖向极限承载力
Fig. 12 Vertical ultimate bearing capacity of pile with change of developing depth of loess cave

从图 11、图 12 可以看出,随着洞穴发育深度的增加,桩基竖向极限承载力逐渐减小。洞穴发育深度在 5 cm 时桩基竖向承载力下降较小,而洞穴发育深度从 5 cm 增至 15 cm 过程中桩基竖向极限承载力下降很多,随着洞穴发育深度继续增加,桩基竖向极限承载力的下降幅度又逐渐变缓。这主要是因为桩侧摩阻力在距地面以下一定深度后才能充分发挥。地表至 5 cm 深度范围的土体对桩侧提供的摩

阻力很小,对桩基竖向极限承载力的影响也很小。因此,在土层 0~5 cm 范围内虽有洞穴,但由于此范围土体对桩基竖向极限承载力的影响很小,桩基竖向极限承载力仅仅比桩周无洞穴分布时降低了 1.4%;而深度 5~15 cm 范围的土层对桩侧提供的摩阻力较大,对桩基竖向极限承载力的影响也较大,当洞穴发育深度从 5 cm 增至 10 cm 或从 10 cm 增至 15 cm 时,由于洞穴的影响,桩周土提供的桩侧摩阻力下降较多,导致桩基竖向极限承载力也下降较多,分别达到了 4.9% 和 3.2%;而桩侧摩阻力在深度大于 15 cm 的范围内发挥程度逐渐减小,深处土层虽分布有洞穴,但此范围内土体对桩侧摩阻力的影响较小,因此洞穴发育深度虽然继续增加,但对桩基竖向极限承载力的影响逐渐减小,从而导致桩基竖向极限承载力的下降幅度逐渐变缓;洞穴发育深度从 20 cm 增至 30 cm 时,桩基竖向极限承载力降低了 2.4%。由此可知,在对桩侧摩阻力贡献较大的土层中,地下洞穴对桩基竖向极限承载力的影响也较大。对于黄土地区桥梁桩基而言,对桩侧摩阻力贡献最大的区域往往集中在桩身中部区域,桩顶一定区域的土层对桩侧摩阻力的贡献不大,桩端区域土层贡献随深度增加而逐渐减小^[25]。因此,结合本试验结果可知:深度为地表至 5 m 深度范围内的洞穴对桩基竖向承载力的影响不大,可不进行处理;而在深度大于 5 m 的范围内,应对地下洞穴进行处理。

3.2 桩身轴力及桩侧摩阻力变化规律

试验数据表明,在相同荷载作用下,随着洞穴发育深度的增加,桩侧摩阻力在洞穴影响下被削弱的范围逐渐增大,桩侧摩阻力逐渐减小,桩身轴力逐渐增大。由于桩顶荷载不同,且洞穴发育深度变化时桩身轴力和桩侧摩阻力的变化规律均基本相同,故仅将桩顶荷载为 450 N 时的桩身轴力和桩侧摩阻力分布示出,如下页图 13、图 14 所示。

4 桩底与洞穴垂直间距变化对桩基竖向承载特性的影响

4.1 极限承载力变化规律

下页图 15 为桩底与洞穴垂直间距变化时的桩基荷载-位移曲线。从图 15 可以看出,当桩底洞穴坍塌时,桩基迅速下沉,图中有明显的拐点,说明桩基发生了急剧下沉。

由于桩基发生急剧下沉时桩顶位移已经大于 1.5 mm,为便于分析,仍取桩顶位移为 1.5 mm 所对应的荷载作为桩基竖向极限承载力,桩底与洞穴垂

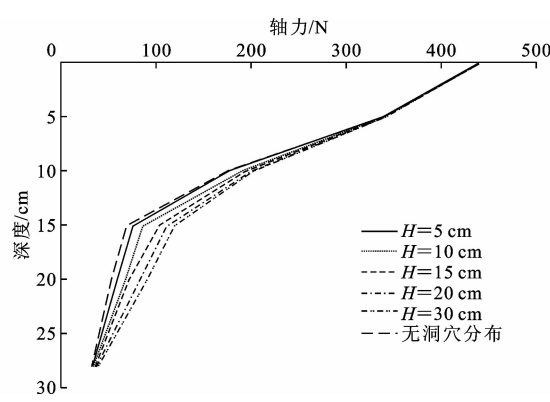


图 13 桩身轴力随洞穴发育深度变化的分布
Fig. 13 Distributions of axial force of pile with change of developing depth of loess cave

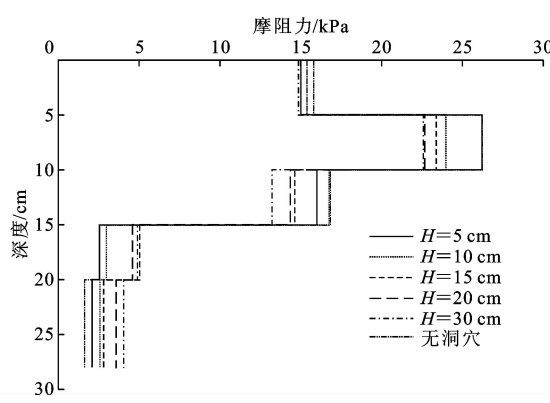


图 14 桩侧摩阻力随洞穴发育深度变化的分布
Fig. 14 Distributions of pile friction with change of developing depth of loess cave

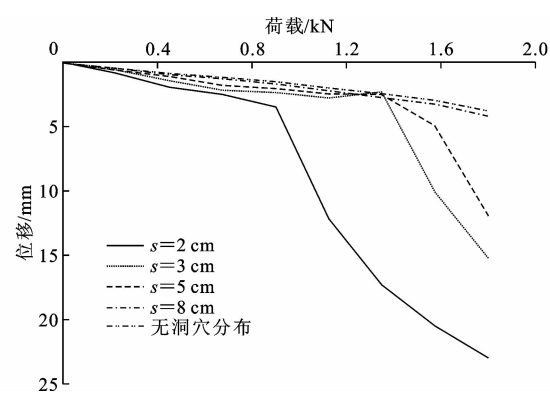


图 15 桩底与洞穴垂直间距 s 变化时的桩基荷载-位移曲线
Fig. 15 Load-displacement curves of pile with change of vertical spacing between pile bottom and loess cave

直间距变化时的桩基竖向极限承载力变化如图 16 所示。从图 16 可以看出:随着桩底与洞穴垂直间距的减小,桩基竖向极限承载力也逐渐减小,桩基竖向极限承载力受桩底与洞穴垂直间距的影响较大,当桩底与洞穴垂直间距为 2 cm 时,桩基竖向极限承载力为 360 N,较桩底无洞穴分布时降低了 59.7%;而当桩底与洞穴垂直间距增大至 8 cm 时,桩基竖向极

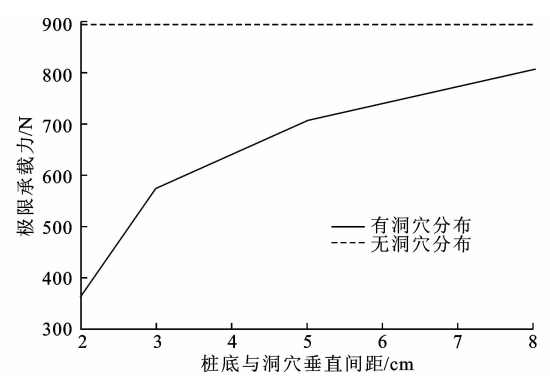


图 16 桩底与洞穴垂直间距变化时的桩基竖向极限承载力
Fig. 16 Vertical ultimate bearing capacity of pile with change of vertical spacing between pile bottom and loess cave

限承载力增加到了 808 N,较桩底无洞穴分布时降低了 9.6%。这说明当桩底与洞穴垂直间距较小时,桩端土体的承载能力较小,桩顶荷载逐渐增大时,传递到桩端的荷载也逐渐增大,当桩端荷载大于桩端土体的承载能力时,桩底洞穴被破坏,桩端土体丧失稳定性。随着桩底与洞穴垂直间距的增大,桩端土体的承载能力随之增大,从而使桩基竖向极限承载力也随之增大,当桩底与洞穴垂直距离为 8 cm 时,桩基竖向极限承载力可达到桩底无洞穴分布时的 90%以上。

由于桩底洞穴对桩端持力层承载能力的影响很大,故对于端承桩来说,需对桩底洞穴特别重视,应对洞穴进行工程处理;对于摩擦桩而言,桩端阻力占桩基竖向极限承载力的比重通常较小,因此,可根据实际情况对桩底洞穴进行处理,结合本试验成果可知,对桩端以下 8 m 范围内的洞穴进行处理后可基本保证桩基安全。

4.2 桩身轴力及桩侧摩阻力变化规律

当桩-土相对位移达到一定值时,桩侧摩阻力才能完全发挥,因此,在不超过使桩侧摩阻力完全发挥的桩顶位移限值的情况下,桩顶位移越大,桩侧摩阻力的发挥也越完全^[26]。在相同荷载下,桩底与洞穴垂直间距 s 越小,桩顶位移越大,使得在上部荷载较小的情况下桩侧摩阻力发挥越完全,桩身轴力衰减也越快。如下页图 17、图 18 所示,在桩顶荷载为 450 N,桩底与洞穴垂直间距为 2 cm 时,桩侧摩阻力最大,随着桩底与洞穴垂直间距的增大,桩侧摩阻力逐渐减小,相应地桩身轴力逐渐增大。

5 工程技术建议

结合本文离心模型试验的研究成果,对桩周和桩底存在地下洞穴情况下桥梁桩基的设计计算和施

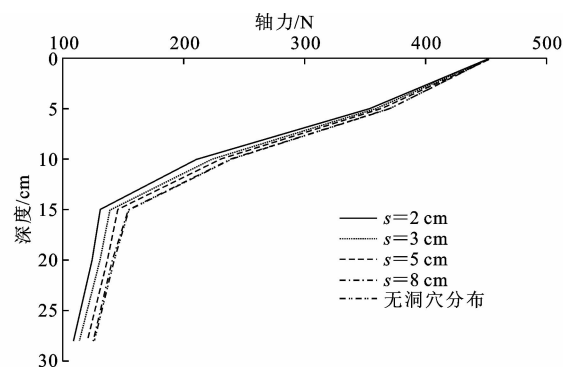


图 17 桩身轴力随桩底与洞穴垂直间距变化的分布

Fig. 17 Distributions of axial force of pile with change of vertical spacing between pile bottom and loess cave

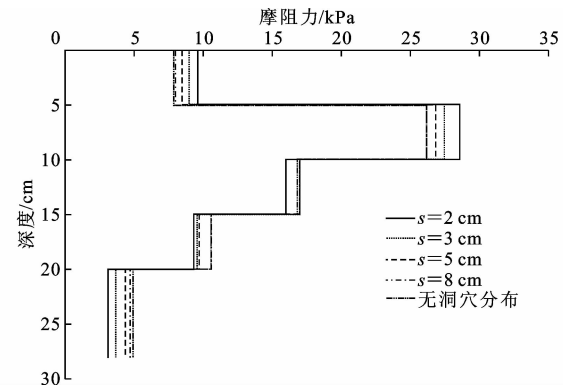


图 18 桩侧摩阻力随桩底与洞穴垂直间距变化的分布

Fig. 18 Distributions of pile friction with change of vertical spacing between pile bottom and loess cave

工提出以下工程技术建议。

(1)对于摩擦桩的桩周地下洞穴,应综合考虑洞穴与桩的水平间距和洞穴所处的深度,对于发育深度在地表至 5 m 深度范围内的洞穴,与桩的水平间距不小于 $0.2D$ 时,可不对洞穴进行处理,此时由于洞穴的影响,桩基竖向极限承载力最大仅降低 1.4%;对于发育深度为 5~20 m 范围内的洞穴,若洞穴与桩的水平间距在 $1.0D$ 范围内,应对地下洞穴进行处理,而对于 $1.0D$ 范围以外的洞穴,可不进行处理,此时桩基竖向极限承载力最大仅降低 5.6%;对于发育深度大于 20 m 的洞穴,若洞穴与桩的水平间距在 $1.0D$ 范围内,可参考上述分析及实际工程特点确定处理强度,若在 $1.0D$ 范围以外,可不进行处理。

(2)对于摩擦桩的桩底地下洞穴,当洞穴与桩底垂直间距在 8 m 以内时,应对洞穴进行相应处理;当洞穴与桩底垂直间距大于 8 m 时,可不对洞穴进行处理,此时桩基竖向极限承载力可达无洞穴分布时的 90% 以上。

(3)对于端承桩的桩周地下洞穴,应综合考虑桩端持力层承载能力,对桩周洞穴进行处理,或仅对部分洞穴进行处理或不处理。

(4)对于端承桩的桩底地下洞穴,为了安全起见,应尽量使桩基穿过洞穴,到达可靠的持力层上。

6 结 语

(1)随着桩与洞穴水平间距的增大,桩基竖向极限承载力逐渐提高,但提高幅度逐渐放缓,当桩与洞穴水平间距达到 $1.0D$ 时,桩基竖向极限承载力可达无洞穴分布时的 94.4%;桩与洞穴的水平间距越小,桩侧摩阻力越小,桩顶荷载向下传递使轴力有所增大。

(2)洞穴分布在地表至 5 m 深度范围内时,较浅范围的土层对桩基竖向极限承载力的影响较小,洞穴分布较浅时的桩基竖向承载力仅降低 1.4%;洞穴发育深度从 5 m 增至 15 m 的过程中,桩基竖向极限承载力下降速度明显增大;当洞穴发育深度从 15 m 继续增至 30 m 时,桩基竖向极限承载力下降速度有所减缓。

(3)当桩底与洞穴垂直间距较小时,桩端土体的承载能力较小,导致桩基竖向极限承载力也较小;随着桩底与洞穴垂直间距的逐渐增大,桩基竖向极限承载力逐渐增大,当桩底与洞穴垂直间距大于 8 m 时,桩基竖向极限承载力可达无洞穴分布时的 90% 以上;桩顶荷载较小时,桩底与洞穴垂直间距越小,桩顶位移越大,使得在上部荷载较小的情况下桩侧摩阻力发挥越完全,桩身轴力衰减也越快;桩顶荷载较大导致桩底洞穴发生坍塌时,桩-土相对位移过大,对土层产生了扰动,使土的抗剪强度有所降低,桩侧摩阻力减小,桩身轴力则因此增大。

(4)下一步可结合实体工程现场试验,进一步验证和修正离心模型试验结果,以提高研究成果的工程实用性。

参考文献:

References:

[1] 朱显谟. 试论黄土高原的生态环境与“土壤水库”——重塑黄土地的理论依据[J]. 第四纪研究, 2000, 20(6): 514-520.
ZHU Xian-mo. Environment in Loess Plateau and “pedogenic reservoir”: the important theory of remolded loess[J]. Quaternary Sciences, 2000, 20(6): 514-520.
[2] 李昌贤. 黄土洞穴成因机制研究[D]. 西安: 长安大

- 学,2004.
- LI Chang-xian. Research on formation mechanism of loess cave[D]. Xi'an:Chang'an University,2004.
- [3] 彭建兵,李喜安,范文,等.黄土高原地区黄土洞穴的分类及发育规律[J].地质前缘,2007,14(6):234-244.
- PENG Jian-bing, LI Xi-an, FAN Wen, et al. Classification and development pattern of caves in the Loess Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2007, 14(6): 234-244.
- [4] 刘占良,张丽娟.黄土暗穴对公路工程的危害及防治对策[J].石家庄铁路职业技术学院学报,2008,7(4):1-5.
- LIU Zhan-liang, ZHANG Li-juan. Analysis on loess hidden hole's hazard to highway engineering and the countermeasures[J]. Journal of Shijiazhuang Institute of Railway Technology, 2008, 7(4): 1-5.
- [5] 李喜安,彭建兵,马润勇,等.黄土洞穴危害及其形成演化机制[J].西安科技大学学报,2009,29(6):737-741.
- LI Xi-an, PENG Jian-bing, MA Run-yong, et al. On the hazards and evolution processes of loess tunnels[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2009, 29(6): 737-741.
- [6] 王朝阳,范敏,杨泓全.湿陷性黄土的环境岩土工程问题及防治对策[J].地下空间与工程学报,2005,1(7):1011-1013.
- WANG Zhao-yang, FAN Min, YANG Hong-quan. Environmental geotechnical engineering problems and countermeasures about the collapsible loess[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005, 1(7): 1011-1013.
- [7] 刘争宏,郑建国,张继文,等.湿陷性黄土地区桥梁桩基工后沉降计算方法研究[J].岩土工程学报,2014,36(2):320-327.
- LIU Zheng-hong, ZHENG Jian-guo, ZHANG Ji-wen, et al. Method for post-construction settlement of pile foundation of bridges in collapsible loess area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 320-327.
- [8] 朱才辉,李宁.黄土高填方地基中暗穴扩展对机场道面变形分析[J].岩石力学与工程学报,2015,34(1):198-206.
- ZHU Cai-hui, LI Ning. Analysis of airstrip deformation due to expansion of hidden cavities in loess filled high embankment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(1): 198-206.
- [9] 李喜安,彭建兵,郑书彦,等.黄土高原地区黄土洞穴的成因研究[J].公路,2005(11):142-146.
- LI Xi-an, PENG Jian-bing, ZHENG Shu-yan, et al. A study on origin of loess caves in Loess Plateau[J]. Highway, 2005(11): 142-146.
- [10] 卢全中,彭建兵,陈志新,等.黄土高原地区黄土裂隙发育特征及其规律研究[J].水土保持学报,2005,19(5):193-196.
- LU Quan-zhong, PENG Jian-bing, CHEN Zhi-xin, et al. Research on characteristics of cracks and fissures of loess and their distribution in Loess Plateau of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5): 193-196.
- [11] 苏生瑞,彭建兵,宋彦辉.黄土洞穴对公路的危害研究[J].公路,2004(11):121-126.
- SU Sheng-rui, PENG Jian-bing, SONG Yan-hui. A study on damages of caves in collapsible loess to highways[J]. Highway, 2004(11): 121-126.
- [12] 苏生瑞,贺汇文.黄土洞穴对公路危害的地质模式及致灾机理[J].工程地质学报,2007,15(4):483-489.
- SU Sheng-rui, HE Hui-wen. Geological mode and mechanism of damage of caves in loess to highway[J]. Journal of Engineering Geology, 2007, 15(4): 483-489.
- [13] 冯忠居,冯瑞玲,赵占厂,等.黄土湿陷性对桥梁桩基承载力的影响[J].交通运输工程学报,2005,5(3):60-63.
- FENG Zhong-ju, FENG Rui-ling, ZHAO Zhan-chang, et al. Effect of collapsible loess on pile foundation bearing capacity[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5(3): 60-63.
- [14] 李晋,谢永利,冯忠居.自重湿陷性黄土地区合理桩长初探[J].岩石力学与工程学报,2005,24(9):1629-1634.
- LI Jin, XIE Yong-li, FENG Zhong-ju. Study of the proper pile length in the self-weight collapsible loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1629-1634.
- [15] 冯忠居,谢永利,张宏光,等.地面水对黄土地区桥梁桩基承载力影响试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(10):1758-1765.
- FENG Zhong-ju, XIE Yong-li, ZHANG Hong-guang, et al. Experimental study on effect of surface water on bearing capacity of pile foundation in loess area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(10): 1758-1765.
- [16] 黄雪峰,陈正汉,哈双,等.大厚度自重湿陷性黄土中灌注桩承载性状与负摩阻力的试验研究[J].岩土工程学报,2007,29(3):338-346.

- HUANG Xue-feng, CHEN Zheng-han, HA Shuang, et al. Research on bearing behaviors and negative friction force for filling piles in the site of collapsible loess with big thickness [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(3): 338-346.
- [17] 冯进世, 柯瀚, 陈云敏, 等. 黄土地基中超长钻孔灌注桩承载性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 110-114.
- FENG Jin-shi, KE Han, CHEN Yun-min, et al. Experimental study on super-long bored pile in loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(1): 110-114.
- [18] 刘志伟, 申汝涛. 钻孔挤密桩处理强湿陷性黄土地基试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增 2): 339-343.
- LIU Zhi-wei, SHEN Ru-tao. Field tests on pre-bored compaction lime-soil pile (down-hole dynamic compaction method) to improve serious collapsible loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 339-343.
- [19] 魏进, 李哲, 郝忙利, 等. 自重湿陷性黄土场地的桩基浸水载荷试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(5): 63-67.
- WEI Jin, LI Zhe, HAO Mang-li, et al. Submerged static load test of pile foundation in collapsible loess area[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2011, 31(5): 63-67.
- [20] 邓亚虹, 彭建兵, 范文, 等. 黄土暗穴对路面结构变形响应的影响分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 673-678.
- DENG Ya-hong, PENG Jian-bing, FAN Wen, et al. Dynamic deformation response of pavement structure subjected to hidden holes in loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 673-678.
- [21] 王长丹, 王旭, 周顺华, 等. 自重湿陷性黄土与单桩负摩阻力离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增 1): 3101-3107.
- WANG Chang-dan, WANG Xu, ZHOU Shun-hua, et al. Centrifugal model tests on self-weight collapsible loess and negative skin friction of pile foundations [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 3101-3107.
- [22] 邓亚虹, 彭建兵, 范文, 等. 公路黄土暗穴临界稳定埋深回归的预测方法及其程序实现[J]. 岩土力学, 2008, 29(6): 1613-1617.
- DENG Ya-hong, PENG Jian-bing, FAN Wen, et al. Study on regression analysis method and programming of critical stable depth of burial of hidden holes in loess under roadbed[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(6): 1613-1617.
- [23] JTG D63—2007, 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. JTG D63—2007, Code for design of ground base and foundation of highway bridges and culverts[S].
- [24] 史佩栋. 桩基工程手册[M]. 2 版. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- SHI Pei-dong. Pile and pile foundation handbook[M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [25] 刘三仓, 隋国秀, 刘志伟. 非饱和-饱和状态下黄土地基中灌注桩承载性能的研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 147-151.
- LIU San-cang, SUI Guo-xiu, LIU Zhi-wei. Research on bearing capacity of cast-in-place piles in unsaturated to saturated loess[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 147-151.
- [26] 李辉, 李进军, 丁永君. 桩侧摩阻力和端阻力的影响因素分析及其应用[J]. 工业建筑, 2007(增 1): 1897-1902.
- LI Hui, LI Jin-jun, DING Yong-jun. Analysis and application of factors influencing the bearing capacity provided by end-bearing and friction[J]. Industrial Structure, 2007(S1): 1897-1902.